

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Přenosné modulární zařízení pro měření provozních veličin v průmyslu

Portable device for measuring operating parameters in industry

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lucie Sebešová**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612T041 Řídicí a informační systémy
Téma: Přenosné zařízení pro měření provozních veličin v průmyslu
Portable Device for Measuring Operating Parameters in Industry
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Prostředky pro měření provozních veličin v průmyslu, zejména pak prostředky pro měření teploty a vibrací.
2. Analýza požadavků a návrh měřicího systému.
3. Návrh a realizace potřebného HW pro měřicí systém.
4. Návrh a implementace FW/SW potřebného pro měřicí systém.
5. Testování v průmyslu.
6. Závěrečná zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1.
- [2] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-158-6.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jaromír Konečný, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně. Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

V Ostravě 30. dubna 2019


.....

Touto cestou bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Jaromírovi Konečnému, PhD. za vedení práce a mé rodině a přátelům za podporu při studiu.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vytvořením samostatného, přenosného zařízení pro měření provozních veličin se zaměřením na monitorování vibrací a teploty elektromotoru s ukládáním a vizualizací měřených dat. V práci je teoreticky rozebrána problematika týkající se přenosu měřených veličin v oblasti automatizace, teorie vibrací a teploty a prostředky pro jejich měření. Pro porozumění problematice daných měření byly nastudovány příslušné normy. Práce dále obsahuje praktickou část, kde jsou popsány požadavky na dané zařízení, návrh a realizace hardwarové části a návrh a implementace softwarové části. Pro řízení všech procesů byla vybrána platforma Raspberry PI. Hardwarová část představuje popis všech dílčích částí jako je řídicí platforma, shield rozšiřující její funkci, obslužné a indikační prvky a pouzdro samotného zařízení. V rámci práce byl následně implementován software ovládající obslužné a indikační prvky a samotný program pro měření provozních veličin. Byly vytvořeny různé typy vizualizace na základě odlišných technologických požadavků jednotlivých provozů. Následně bylo provedeno testování výsledného zařízení v průmyslovém prostředí. Závěr práce je věnován zhodnocení a návrhu inovací.

Klíčová slova: provozní veličiny, průmysl, monitorování, vibrace, teplota, procesní vizualizace, CODESYS, WinCC, SCADA, RaspberryPI, PLC

Abstract

This master thesis deals with construction of independent, portable device for measuring operating parameters focusing on monitoring vibration and temperature of electric motor including saving and visualization of measured data. The thesis introduction contains analysis of transmission of measured parameters in automatization, theory of vibration and temperature and available sensors. Standards were studied for understanding those measurements. The next section of the thesis contains an experimental part which describes requirements, hardware design and realization and software design and implementation. Raspberry PI platform was chosen as control of all programs. Hardware part represents description of all parts which are control platform, designed shield for extending functionality of RPi, service and indication elements and device case. The following part describes software implementation for control of service and indication elements and the actual program for measuring operating parameters. Based on different technological requirements different types of visualization were designed. Testing of final device was done in industrial environment. The conclusion of the thesis discusses evaluation and ideas for innovation.

Key Words: operating parameters, industry, monitoring, vibration, temperature, process visualization, CODESYS, WinCC, SCADA, RaspberryPI, PLC

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Seznam použitých zkratk a symbolů | 8 |
| Seznam obrázků | 10 |
| Seznam tabulek | 12 |
| Úvod | 13 |
| 1 Měření provozních veličn | 14 |
| 1.1 Přenos naměřených hodnot v oblasti průmyslové automatizace | 14 |
| 1.2 Měření teploty | 15 |
| 2 Měření vibrací | 19 |
| 2.1 Vibrace | 19 |
| 2.2 Principy měření vibrací | 21 |
| 2.3 Snímače vibrací | 21 |
| 2.4 Uchycení snímačů | 26 |
| 2.5 Měřicí místa | 27 |
| 2.6 Kabeláž | 28 |
| 2.7 Analýza signálu | 28 |
| 2.8 Měření vibrací na elektromotorech | 32 |
| 3 Analýza požadavků a měřicí řetězec | 34 |
| 4 Návrh a realizace HW | 36 |
| 4.1 Shield pro Raspberry PI | 36 |
| 4.2 Obslužné a indikační prvky | 40 |
| 4.3 Napájecí zdroj | 41 |
| 5 Návrh a implementace SW | 42 |
| 5.1 Inicializace po startu Raspberry PI | 42 |
| 5.2 Program pro měření provozních veličin | 43 |
| 5.3 Vizualizace | 48 |
| 6 Testování | 53 |
| 6.1 Funkce vytvořeného shieldu pro Raspberry PI | 53 |
| 6.2 Finální zařízení v průmyslovém prostředí | 55 |
| Závěr | 60 |

| | |
|----------------------|-----------|
| Literatura | 62 |
| Seznam příloh | 65 |

Seznam použitých zkratk a symbolů

| | |
|------------------|--|
| A/D | – Analog/Digital |
| ADDR | – Address |
| DPS | – Deská plošných spojů |
| FFT | – Rychlá Fourierova transformace |
| GND | – Signálová zem |
| GPIO | – General-Purpose Input/Output |
| I ² C | – Inter-Integrated Circuit |
| I/U | – Proud/Napětí |
| IP | – Stupeň krytí |
| LED | – Light-Emitting Diode |
| MEMS | – Microelectromechanical systems |
| ODS | – Provozní tvar kmitu (Operating deflection shape) |
| OPC UA | – OPC Unified Architecture |
| PLC | – Programovatelný logický automat |
| SCADA | – Supervisory Control And Data Acquisition |
| SCL | – Synchronous Clock |
| SDA | – Synchronous Data |
| USB | – Universal Serial Bus |
| B | – Magnetická indukce |
| C | – Celsius |
| F _b | – Budicí síla |
| G | – Zesílení |
| Hz | – Hertz |
| K | – Kelvin |
| R | – Rezistor |
| T | – Perioda |
| U | – Napětí |
| V | – Volt |
| X | – Amplituda |
| X _{ef} | – Efektivní hodnota |
| b | – Součinitel tlumení |
| g | – Tíhové zrychlení |
| mA | – Miliampér |
| k | – Tuhost pružiny |
| kHz | – Kiloherztz |
| l | – Délka |

| | | |
|------------------|---|----------------------------|
| m | – | Hmotnost |
| m/s ² | – | Metr za sekundu |
| mil | – | Miliinch (tisícina palce) |
| min | – | Minuta |
| mm | – | Milimetr |
| s | – | Sekunda |
| t | – | Teplota |
| v | – | Rychlost |
| α | – | Teplotní součinitel odporu |
| μ | – | Mikro |
| Ω | – | Ohm |
| ° | – | Stupeň |

Seznam obrázků

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Srovnání charakteristik odporových teplotních senzorů, NTC – negastory, Pt – platinový odporový senzor, Ni – niklový odporový senzor [25] | 17 |
| 2 | Statické charakteristiky vybraných typů termočlánků, upraveno: [16] | 18 |
| 3 | Znázornění směrů šesti stupňů volnosti | 20 |
| 4 | Časové průběhy vibrací a jejich spektra [18] | 20 |
| 5 | Znázornění relativních a absolutních kmitů, upraveno [18] | 22 |
| 6 | Princip snímače rychlosti [20] | 23 |
| 7 | Typické frekvenční charakteristiky pro různé citlivosti piezoelektrických akcelero- metrů [1] | 25 |
| 8 | Vliv způsobu uchycení na amplitudovou frekvenční charakteristiku [1] | 27 |
| 9 | Měřicí body a směry na malých elektrických strojích, upraveno: [9] | 28 |
| 10 | Harmonický signál s kruhovou úhlovou rychlostí [19] | 29 |
| 11 | Blokové schéma vibrometru celkových vibrací 1 – piezoelektrický akcelerometr, F – širokopásmový filtr, upraveno: [1] | 31 |
| 12 | Trendy celkových vibrací [3] | 32 |
| 13 | Vývojový diagram vibrační diagnostiky elektromotorů. Vyznačená část předsta- vuje část procesu, jehož řešením se zabývá tato práce, upraveno: [8] | 33 |
| 14 | Schéma měřicího řetězce | 34 |
| 15 | Monitor vibrací VKV021 od firmy IFM | 34 |
| 16 | Sonda s teplotním čidlem DS18B20 od firmy Maxim Integrated | 35 |
| 17 | Popis výsledného zařízení | 36 |
| 18 | Konektor 4x2 pro připojení k Raspberry PI | 37 |
| 19 | Zapojení A/D převodníku s ADS1115 | 38 |
| 20 | Zapojení I/U převodníku s INA122 | 38 |
| 21 | Zapojení pro sběr teplotních dat z DS18B20 | 39 |
| 22 | Zapojení hodin reálného času s DS3231 a baterií | 40 |
| 23 | Výsledná DPS | 41 |
| 24 | Diagram aktivit po spuštění Raspberry PI | 43 |
| 25 | Menu v prostředí CODESYS s připojeným Raspberry PI a jednotlivými programy a zařízeními | 43 |
| 26 | Diagram aktivit pro program v prostředí Codesys na Raspberry PI | 44 |
| 27 | Ukázka kódu: Konfigurace vyčítání dat pro kanál AIN0 | 45 |
| 28 | Ukázka kódu: přepočet rozsahu přijímaných dat z AD převodníku | 45 |
| 29 | Ukázka kódu: Přepočet hodnoty z AD převodníku na rychlost vibrací | 46 |
| 30 | Ukázka kódu: Inicializace CSV | 47 |
| 31 | Ukázka kódu: Vytvoření nového CSV souboru každou hodinu | 47 |
| 32 | Ukázka kódu: Logika pro indikaci chyby | 47 |

| | | |
|----|--|------|
| 33 | Ukázka objektu konfigurace symbolů | 48 |
| 34 | Ukázka webové vizualizace vytvořené v prostředí CODESYS | 49 |
| 35 | Vytvoření nového spojení OPC serveru | 50 |
| 36 | Ukázka vizualizace vytvořené v prostředí SIMATIC WinCC, část okna | 51 |
| 37 | Ukázka vizualizace vytvořené v prostředí SIMATIC WinCC, český alarm | 51 |
| 38 | Ukázka vizualizace vytvořené v prostředí SIMATIC WinCC, anglický alarm | 51 |
| 39 | Graf vytvořený z uložených hodnot v programu MS Office Excel | 52 |
| 40 | Průběhy výsledků měření proudových vstupů a ideálních hodnot, $t_o = 25, 75^{\circ}\text{C}$ | 54 |
| 41 | Detail průběhů výsledků měření pro hodnoty proudu (15 – 20) mA, $t_o = 25, 75^{\circ}\text{C}$ | 55 |
| 42 | Upevnění vibračních snímačů na elektromotoru | 56 |
| 43 | Upevnění teplotního snímače na elektromotoru | 57 |
| 44 | Naměřené hodnoty provozních veličin při frekvenci 50 Hz, vizualizace: WinCC | 58 |
| 45 | Naměřené hodnoty provozních veličin při frekvenci 55 Hz, vizualizace: WinCC | 58 |
| 46 | Naměřené hodnoty provozních veličin při frekvenci 55 Hz, vizualizace: Excel | 59 |
| 47 | Naměřené hodnoty provozních veličin 18.4.2019 (11 – 12) AM | 59 |
| 48 | Celkové schéma navrženého shieldu | II |
| 49 | Zobrazení cest na DPS, vsrtva TOP a BOTTOM | III |
| 50 | Zobrazení vrstvy potisku rozmístění komponent na DPS | III |
| 51 | Celkové schéma zařízení | IV |
| 52 | Fotka soustrojí s měřicím zařízením | VII |
| 53 | Fotka testovaného elektromotoru, upevnění, měřicí zařízení | VII |
| 54 | Výsledné zařízení, zvenku | VIII |
| 55 | Výsledné zařízení, uvnitř | VIII |
| 56 | Princip frekvenční analýzy [3] | IX |
| 57 | Amplitudové frekvenční spektrum [3] | X |
| 58 | Srovnání spekter při různých váhových oknech [3] | XI |
| 59 | Srovnání referenčního a naměřeného spektra [3] | XI |

Seznam tabulek

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Srovnání délek vedení pro jednotlivé analogové signály [16] | 15 |
| 2 | Srovnání typů akcelerometrů [3] | 25 |
| 3 | Orientační meze vibrací stroje v pásmu (10-1000)Hz [3] | 30 |

Úvod

Trendem poslední doby je automatizace kontroly a diagnostiky strojů. Pro správný chod provozu je důležité detekovat jeho stav, kvalitu, opotřebení. Dochází k vývoji zařízení, která budou kontrolovat sama sebe nebo okolní zařízení, budou mezi sebou komunikovat a reagovat na změny tak, aby nebyl narušen chod provozu a tím byla zvýšena bezpečnost a spolehlivost. Cílem této diplomové práce je vytvoření samostatného zařízení pro měření a ukládání provozních veličin se zaměřením na měření vibrací a teploty. Práce byla vytvořena ve spolupráci s místním průmyslovým podnikem.

Je vytvořena jak hardwarová, tak softwarová část. Hardwarová část představuje vybranou platformu Raspberry PI, vytvořený modul rozšiřující funkci Raspberry PI, vypínací tlačítko, indikační LED diody, konektor RJ-45 a napájecí zdroj, které jsou uloženy v plastovém šasi s krytím IP55. Softwarová část slouží pro obsluhu funkce tlačítka a LED diod a samotné měření vybraných veličin.

První část práce je zaměřena na pochopení daného tématu. Součástí tohoto procesu je nastudování norem týkajících se měření vibrací a teploty. Problematika měření provozních veličin spolu s měřením teploty je popsána v kapitole 1. Zde jsou popsány různé metody přenosu signálu v průmyslovém prostředí a jednotlivé teplotní senzory a jejich principy. Kapitola 2 je zaměřena na měření vibrací. Z důvodu rozsáhlosti tématu je její část uvedena jako Příloha IV.

V kapitolách 3 – 6 je popsána praktická část. Kapitola 3 obsahuje analýzu požadavků a návrh měřicího řetězce. Požadavky jsou na samostatnost, modulárnost, ukládání dat a různé typy vizualizace z důvodu odlišných technologických možností provozů. Následující kapitoly jsou zaměřeny na vytvoření daného zařízení. V kapitole 4 je popsána tvorba hardwarové části. Další kapitola je věnována popisu implementace jednotlivých složek softwaru. Je zde popsána inicializace Raspberry PI po startu a hlavní program pro monitorování provozních veličin. Další částí této kapitoly je popis různých typů vizualizací vytvořených na základě jednotlivých požadavků.

Vytvořený rozšiřující modul byl otestován pomocí kalibrátoru. Pro ověření správnosti funkce a doladění celého zařízení bylo provedeno testování v průmyslovém prostředí. Výsledky popisuje kapitola 6.

1 Měření provozních veličn

Pro správný chod zařízení je důležité detekovat jeho stav, kvalitu, opotřebení. Trendem poslední doby je automatizování nejen výrobního procesu, ale i kontroly a diagnostiky daných strojů. To představuje zařízení, pro kontrolu sebe sama nebo okolních zařízení, která mezi sebou mohou komunikovat a reagovat na změny tak, aby nebyl narušen chod provozu. Na základě typu kontrolovaného provozu je potřeba vybrat příslušné senzory. Při měření neelektrických veličin se používají převodníky. Část energie z měřeného systému je odebírána převodníkem, který jej měří a výstupem je tato energie převedená na elektrický signál úměrný měřené veličině. Elektrické převodníky je možné sestavit pro libovolné veličiny, jako je teplota, průtok kapaliny nebo plynu, vibrace apod. Senzory pro měření veličin se rozdělují podle různých kritérií, např. podle druhu vstupního signálu. Dělení podle druhu vstupního signálu a příklady senzorů:

- mechanické – délka, poloha, rychlost, zrychlení
- tepelné – teplota, tepelný tok
- elektrické – napětí, proud, odpor, kapacita
- magnetické – indukce, intenzita
- optické – intenzita, energie
- akustické – intenzita, frekvence, akustický tlak
- chemické – koncentrace, pH
- biologické – biopotenciály, aktivita
- radiační – intenzita záření, druh

[4]

Výsledkem této práce bude samostatné zařízení pro měření provozních veličin, avšak je zaměřena především na měření teploty a vibrací. Z důvodu rozsahu tématu je měření vibrací věnována samostatná kapitola 2.

1.1 Přenos naměřených hodnot v oblasti průmyslové automatizace

V průmyslových procesech dochází k získávání informací od senzorů s analogovým výstupem třemi způsoby: proudová smyčka (4 – 20) mA, proudová smyčka (0 – 20) mA a napěťová smyčka (0 – 10) V. Často využívaným standardem je proudová smyčka (4 – 20) mA. Její výhodou je přenos na vzdálenosti stovek metrů bez narušení šumem díky vysoké imunitě vůči elektromagnetickému rušení, které se v průmyslu často vyskytuje. Princip spočívá v přenosu signálu senzoru na poměrný proud tak, že 4 mA odpovídají nulové hodnotě výstupu senzoru a 20 mA

představuje nejvyšší hodnotu. Limit 4 mA pro nulovou hodnotu výstupu senzoru zaručuje detekci přerušení smyčky. V případě, že je proud 0 mA je možné signalizovat poruchu v systému a rozsah 4 mA až 20 mA signalizuje, že obvod funguje správně. Možnost indikovat poruchu systému je další výhoda oproti proudové smyčce (0 – 20) mA. Vyhodnocovací zařízení poté převede proud na signál, který se dále může zpracovat buď analogově nebo převést na digitální signál. [23, 24]

Na rozdíl od proudové smyčky, přenos napěťového signálu ztrácí možnost přenosu na velké vzdálenosti. Při přenosu napěťového signálu dochází k růstu úbytku napětí na vedení z důvodu nenulového odporu vodiče a vstupního odporu přijímače. [23]

Tabulka 1: Srovnání délek vedení pro jednotlivé analogové signály [16]

| Typ signálu | Podmínky | Délka vedení |
|---------------------------------|---|---------------|
| Napětí ($\pm 1 - \pm 10$) V | Stíněný kabel Šířka pásma 10 Hz Přesnost 0,5 % Průměrné prům. rušení | 15 až 19 m |
| Napětí ($\pm 0,01 - \pm 1$) V | Stíněný kabel Šířka pásma 10 Hz Přesnost 0,5 % Průměrné prům. rušení | 1,5 až 30 m |
| Proud (4 – 20) mA | Stíněný kabel Šířka pásma 10 Hz Přesnost 0,5 % Průměrné prům. rušení | 300 až 1500 m |

1.2 Měření teploty

Teplota je nejčastěji měřenou provozní veličinou. Její hodnota ovlivňuje stavy a procesy jak v přírodě, tak v průmyslu. Normou, která se zabývá měřením teploty v průmyslu je „ČSN 25 8010: Směrnice pro měření teplot v průmyslu“. Tato norma obsahuje informace pro správný výběr přístrojů a jejich umístění. Další užitečnou normou k tomuto tématu je „ČSN EN 60751: Průmyslové platinové odporové a platinové teplotní senzory“ z roku 2014, ze které je možné vyčíst požadavky a vztahy závislosti odporu na teplotě, čehož využívají průmyslové teplotní senzory. [10, 11]

Teplota

Hodnota teploty určuje stav dané látky, která může být pevná, kapalná nebo plynná. Teplota představuje kinetickou energii pohybujících se molekul. Teplota se měří nepřímou, to znamená, že se měří prostřednictvím jiných fyzikálních veličin a následně je jejich hodnota převedena na hodnotu teploty. Jsou obecně známé, mimo jiné, dvě teplotní stupnice, Kelvinova a Celsiova. Termodynamická teplotní stupnice využívá jednotku kelvina a její počátek je dán termodynamickou absolutní nulou. Celsiova teplotní stupnice využívá jednotku stupně Celsia a její počátek

je posunut o 273,15 K a určuje bod tuhnutí vody. Mezinárodní teplotní stupnicí je ITS-90. Je důležité vybrat vhodný teploměr, ale je také nutné ho umístit správně tak, aby nebyl ovlivňován rušivými vlivy. Teploměry obsahují senzory teploty, které se dělí na dotykové a bezdotykové. Dotykové senzory se dále dělí na elektrické, dilatační a speciální. Následující kapitoly jsou zaměřeny na elektrické teplotní senzory. [10, 17]

1.2.1 Elektrické teplotní senzory

Odporové kovové senzory

Podstatou těchto senzorů je závislost odporu kovu na teplotě, kdy ve většině případů jejich odpor roste spolu s rostoucí teplotou. Princip spočívá ve vedení proudu valenčními elektrony. Ty mají s jádrem velice slabé vazby a vytváří tzv. elektronový plyn. Při zvýšení teplotě dochází k růstu amplitudy kmitů jednotlivých atomů. Elektrony mají tímto znesnadněn průchod a zvyšuje se elektrický odpor materiálu. [22]

Základní konstantou většiny kovových senzorů je teplotní součinitel odporu α (1). V rozsahu od 0 °C do 100 °C jsou vztahy lineární, pro větší rozsah je ale nelze použít. Použité kovy pro odporové senzory jsou platina, nikl, slitina niklu a železa, měď atd. [10]

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{\delta R}{\delta t} \cong \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad (1)$$

Z uvedených je nejčastěji používaným kovem čistá platina, z důvodu její chemické netečnosti, časové stálosti parametrů a vysoké teplotě tavení. Platinový drát nebo její tenká vrstva je umístěna v izolátoru ze skla nebo z keramiky a představuje rezistor, který je navržen, aby byl vestavěn do odporového teploměru nebo do integrovaného obvodu. Provozní teploměry měří s určitými chybami a podle dohodnutých mezí se dělí do dvou tolerančních tříd. Tyto třídy jsou dány normami a IEC (International Electrotechnical Commission).

- třída A - měřicí teplotní rozsah $(-200 - +650)^{\circ}\text{C}$, tolerance $(\pm 0,15 + 0,002 \cdot |t|)^{\circ}\text{C}$
- třída B - měřicí teplotní rozsah $(-200 - +850)^{\circ}\text{C}$, tolerance $(\pm 0,3 + 0,005 \cdot |t|)^{\circ}\text{C}$

Např. odpor teploměru PT100 při 0 °C hodnotu 100 Ω a při 100 °C má odpor hodnotu 135,5 Ω , jeho teplotní součinitel se rovná 3,851 $^{\circ}\text{C}^{-1}$. [2, 11, 21]

Polovodičové odporové senzory

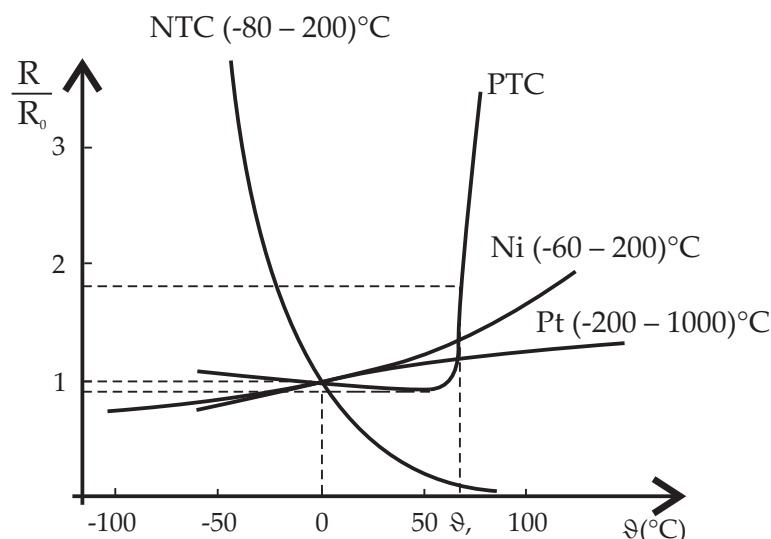
Podobně jako u kovových senzorů teploty se u polovodičových využívá závislosti odporu na teplotě. Rozdíl je ve vodivosti polovodičů a tím pádem i vlastnostech senzorů. Vodivost polovodičů je při absolutní nule nulová z důvodu pevných vazeb elektronů k jádru. Pro přechod elektronů do vodivostního pásma je třeba dodat určitou energii. V případě senzorů teploty je to energie tepelná. Koncentrace nosičů náboje roste spolu s rostoucí teplotou a tím pádem se snižuje elektrický odpor materiálu. Tohoto jevu se využívá v případě negistorů. U pozistorů

dochází ke snižování odporu, avšak při překročení Curierovy teploty odpor prudce roste. Hodnota Curierovy teploty se liší v závislosti na použitém materiálu.

- termistory
 - negastory – záporný teplotní součinitel, měřicí teplotní rozsah $(-50 - 150)^{\circ}\text{C}$,
 - pozistory – kladný teplotní součinitel, měřicí teplotní rozsah $(-60 - 180)^{\circ}\text{C}$,
- monokrystalické senzory – kladný teplotní součinitel, měřicí teplotní rozsah $(-50 - 150)^{\circ}\text{C}$,

[2, 15, 22]

Nejčastěji využívaným monokrystalem je křemík. Principem je závislost pohyblivosti volných nosičů náboje na teplotě. Při vzrůstající teplotě dochází ke snížení pohyblivosti volných nosičů. Sníženou pohyblivostí těchto nosičů roste, podobně jako u kovů, rezistivita. Odpor monokrystalického senzoru při teplotě 25°C je obvykle 1000 nebo 2000 Ω . Ve srovnání s negastory je nelinearita závislosti odporu na teplotě lepší, ale horší než u platinových senzorů. Z důvodu nelinearity je třeba přidat linearizační obvody, jinak je možné tyto senzory použít jako náhradu platinových čidel v aplikacích, kde není třeba tak velký měřicí teplotní rozsah a přenos.



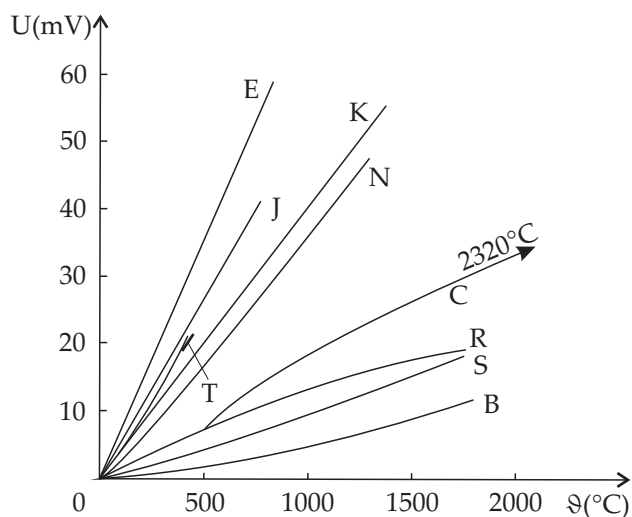
Obrázek 1: Srovnání charakteristik odporových teplotních senzorů, NTC – negastory, Pt – platinový odporový senzor, Ni – niklový odporový senzor [25]

Termoelektrické senzory teploty

Princip termoelektrických senzorů teploty, tzv. termočlánků, se zakládá na Seebeckově jevu. Tento jev vyjadřuje stav, kdy vzniká elektrické napětí vlivem rozdílné teploty kovů. Termočlánky se skládají ze dvou vodičů, vyrobených ze dvou různých kovů, které jsou na jednom konci vodičů spojené – měřicí spoj termočlánku. Volné konce vodičů představují srovnávací spoj. Při zahřívání měřicího spoje se mezi volnými konci vodiče generuje stejnosměrné napětí, které je

řádově v mV. Toto napětí je úměrné rozdílu teplot mezi jednotlivými konci termočládku. Například u kovových vodičů je to 5,2 mV na 100 stupňů teplotního rozdílu.

Termoelektrické teplotní senzory jsou používány pro měření teploty v řádech stovek stupňů s vysokou citlivostí, která se pohybuje v řádech desítek μV . Druhy termočládků jsou rozlišeny na základě použitých kovů a jejich označení popisuje norma „ČSN EN 60584-1 ed 2. Termoelektrické články - Část 1: Údaje napětí a tolerance.“ Termočlánky se značí velkými písmeny a rozlišují se typy R, S, B, J, T, E, K, N, C, A. [2, 12]



Obrázek 2: Statické charakteristiky vybraných typů termočládků, upraveno: [16]

2 Měření vibrací

Měření vibrací slouží k průběžné kontrole, diagnostice a sledování provozního stavu strojů. Důležitou roli hraje měření vibrací při detekci poškození nebo opotřebení pohyblivých strojů. Vibrace nepříznivě působí na jejich provoz. Pomocí měření vibrací je možné identifikovat problémy s ložisky, rotory apod. dříve, než dojde k poruše stroje. Obor, který se tímto zabývá se nazývá vibrodiagnostika a popisují ho normy „ČSN ISO 13373-1: Monitorování stavu a diagnostika strojů – Monitorování stavu vibrací – Část 1: Obecné postupy” a „ČSN ISO 13373-2: Monitorování stavu a diagnostika strojů – Monitorování stavu vibrací – Část 2: Zpracování, prezentace a analýza vibračních dat”. [19] Další normy, týkající se vibrací, ze kterých je čerpáno v rámci práce, jsou ČSN ISO 7919, ČSN ISO 10816 a ČSN ISO 20816.

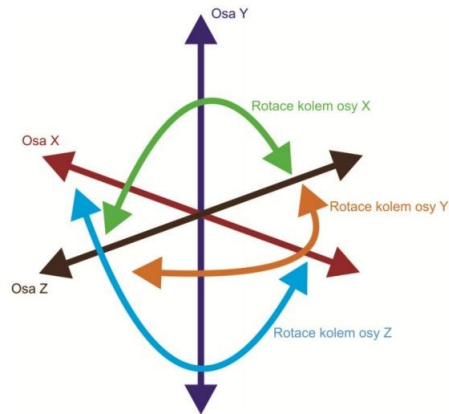
2.1 Vibrace

Dynamický jev, při kterém hmotný bod nebo tuhé těleso vykonává vratný pohyb kolem klidové rovnovážné polohy, se nazývá mechanické kmitání. Rovnovážnou polohou tělesa se rozumí nulová hodnota působících sil, kmitání je naopak způsobeno budicí silou, která může být externí nebo interní. Termín kmitání je ekvivalentní pojmu vibrace dle normy ČSN ISO 2041: „Vibrace a rázy – Slovník”. Vibrace tělesa jsou popsány kombinací šesti pohybů, což jsou posuny v ortogonální soustavě souřadnic x , y , z a rotací kolem těchto os. Tuto skutečnost nazýváme, že systém má šest stupňů volnosti.

Při oscilačním pohybu tělesa kolem své referenční polohy vznikají vibrace. Pokud je pohyb čistě harmonický, tzn. obsahuje pouze jednu frekvenci, je možné určit amplitudu, efektivní hodnotu a střední hodnotu. Ve spektru se nachází pouze jeden kmit na frekvenci vibrací (Obrázek 4a). V praxi vibrace obsahují velké množství frekvencí o různých amplitudách. V případě periodického děje se ve spektru nachází základní frekvence, vyšší harmonické a přídavné frekvence (Obrázek 4b). Dále se mohou objevit náhodné vibrace, které jsou neperiodické a jejich hodnoty se s časem mění. Ve spektru takovýchto vibrací se vyskytují plynule všechny frekvence od nuly do maximální frekvence (Obrázek 4c). [19]

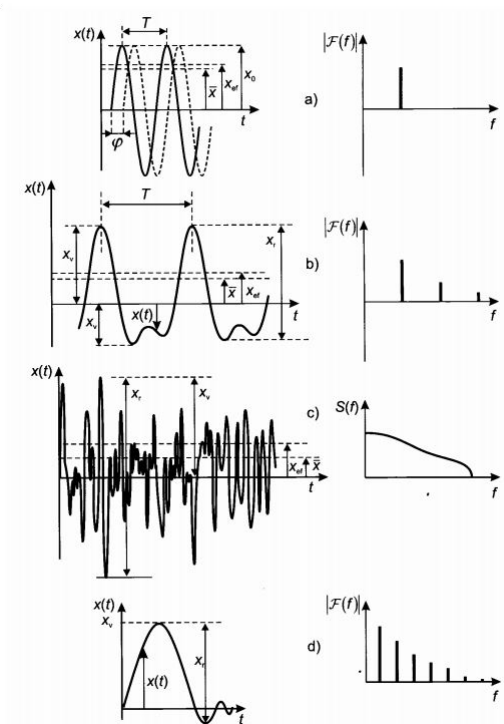
Z uvedených informací lze vyčíst, že vibrace jsou charakterizovány frekvencí a amplitudou. Mimoto jsou popisovány svojí rychlostí, zrychlením, časovým průběhem a směrem. [20]

Vzhledem ke skutečnosti, že tuhost není nekonečně velká a kmitočtově nezávislá u většiny mechanických systémů a že těleso nekmitá jako jeden pevný bod, dochází ke vzniku vln. Vlnou se nazývá změna vlastností nebo fyzikálního stavu prostředí, která se šíří v tomto prostředí a zároveň přenáší energii, avšak nedochází k přemísťování prostředí. V tělesech jednotlivé body kmitají s různou výchylkou a fází a šíří se postupnými vlnami pružným prostředím. V tělese může dojít ke vzniku stojaté vlny, což nastane v případě, že se vlivem odrazu superponují dvě totožné vlny a šíří se proti sobě stejnou fázovou rychlostí. U stojaté vlny nedochází ke změně rozložení maximálních a minimálních výchylek kmitání. V praxi často dochází k superpozici vibrací a vln. [1]



Obrázek 3: Znázornění směrů šesti stupňů volnosti

Kmitání, resp. vibrace, stroje jsou velmi dobrým ukazatelem namáhání, technického stavu stroje a jeho funkce. Obvyklými monitorovanými stroji jsou ty, které zahrnují práci ložisek, hřídelí, klikových ústrojí, vačkových mechanismů, rotačních součástí aj. Jednou z možností monitorování je širokopásmové měření celkových úrovní vibrací. Ve většině případů se provádí v definovaném rozsahu podle platných norem nebo podle doporučení výrobců a uživatelů daného zařízení. [1, 3]



Obrázek 4: Časové průběhy vibrací a jejich spektra [18]

2.2 Principy měření vibrací

Tato část práce je zaměřena na vibrodiagnostiku v údržbě. Tu je možné rozdělit podle četnosti měření:

- jednorázové měření – důsledek změny stavu zařízení, tzv. reaktivní údržba
- periodická měření – provádí se s pravidelným časovým odstupem, který je daný důležitostí a typem zařízení, tzv. prediktivní a preventivní údržba
- online měření – kontinuální měření, je zde možnost ochrany při překročení stanovených mezí

Pohyb, resp. vibrace, je obecně vyjádřen dráhou (výchylkou), rychlostí nebo zrychlením. Tyto charakteristické veličiny lze navzájem přepočítat s použitím integrace nebo derivace. Volba veličiny pro popis vibrace je závislá na měřítku a časovém posunu (fázi).

- výchylka – udává se v mikrometrech (μm)
- rychlost – první derivace výchylky podle času, udává se v milimetrech za sekundu (mm/s)
- zrychlení – druhá derivace výchylky podle času, udává se v m/s^2 nebo v g

Běžná měření se pohybují v rozmezí 10 Hz – 1 000 Hz a jejich měřená veličina je rychlost. Pro nižší frekvence má přednost výchylka a pro vyšší frekvence zrychlení. Daný frekvenční rozsah je jedním z faktorů rozhodujících o typu měřené veličiny, resp. typu snímače. Pokud je měření omezeno na otáčkovou frekvenci, je vhodné, v závislosti na použití, zvolit měření výchylky nebo rychlosti.

Při měření výchylky a zrychlení je potřebné uvést při jaké frekvenci otáčení byla hodnota naměřena. Toto se netýká měření rychlosti. Pro diagnostiku pravidelně rotujících částí je nejvhodnějším parametrem rychlost vibrací. Nejčastějšími snímači jsou v dnešní době akcelerometry, ze kterých se získává hodnota rychlosti integrováním hodnot zrychlení.

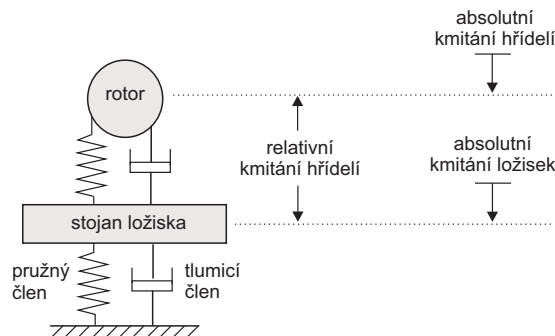
Dalším parametrem je určení, zda se jedná o vibrace absolutní nebo relativní. Absolutní vibrace popisují pohyb tělesa vzhledem k Zemi, v případě relativních vibrací jde o pohyb vůči uměle vytvořené, resp. vhodně zvolené základně. (Obrázek 5)

Akcelerometr měří absolutní vibrace. Zrychlení je měřítkem síly, která na částici působí a okamžité zrychlení je dáno změnou rychlosti. Relativní vibrace jsou měřeny pomocí snímačů výchylky, např. při měření vibrací rotoru vůči statorové části, která může sama kmitat. [19, 20]

2.3 Snímače vibrací

Podle typu snímané veličiny dělíme snímače vibrací:

- snímače výchylky – bezdotykové sondy (sondy na vířivé proudy)



Obrázek 5: Znázornění relativních a absolutních kmitů, upraveno [18]

- snímače rychlosti – velometry
- snímače zrychlení – akcelerometry

Ideálně platí:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = F_b = M\ddot{x}, \quad (2)$$

kde

y výchylka

\dot{y} rychlost

\ddot{y} zrychlení

\ddot{x} zrychlení objektu

m hmotnost seizmické hmoty snímače

M hmotnost objektu

k tuhost pružiny

b součinitel tlumení

F_b budicí síla

Na základě modelu (2) lze vhodnou volbou hodnot parametrů m , b a k vytvořit snímač kterékoliv z charakteristických veličin kmitavého pohybu, tedy výchylky, rychlosti a zrychlení.

2.3.1 Snímače výchylky

Tento typ snímačů je obecně sestaven na indukčním, indukčnostním, kapacitním, magnetickém nebo optickém principu. Pro měření vibrací se nejčastěji používají indukčnostní snímače výchylky. Tyto snímače pracují na základě závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Vyrábějí se integrované, základní část elektroniky je spolu s cívkou uzavřena

pod kovovým stínícím krytem, který zabraňuje působení vnějších elektromagnetických polí. Dalším parazitickým jevem je délka kabelu. Tyto snímače jsou více náchylné k ovlivnění těmito jevy, kvůli svému vysokofrekvenčnímu principu. Při zanedbatelném tlumení b a tuhosti k mají snímače výchylky poměrně vysokou hmotnost m a tím pádem dochází ke změně předchozího vztahu (2):

$$m\ddot{y} = M\ddot{x} \Rightarrow y \approx x \quad (3)$$

2.3.2 Snímače rychlosti

Výstupem je rychlost kmitavého pohybu, tedy veličina, která je uváděna v normách jako základní pro hodnocení vibrací v časové oblasti. Úpravou modelu (2), kdy se zahrne dominantní tlumení a zanedbatelně malé hodnoty m a k se dostane následující vztah:

$$b\dot{y} = M\ddot{x} \Rightarrow y \approx \dot{x} \quad (4)$$

Princip snímače rychlosti zahrnuje měřicí cívku, která se pohybuje v magnetickém poli permanentního magnetu. Ten je tvořen seizmickou hmotou snímače. Při kmitavém pohybu měřeného tělesa, který se přenáší na cívku, se v cívce indukuje elektromotorické napětí (5). Příklad principu takového snímače je na Obrázku 6.

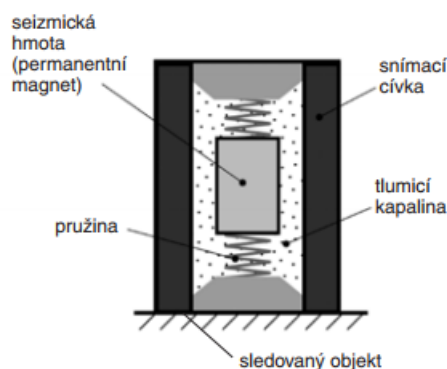
$$U = B \cdot l \cdot v, \quad (5)$$

kde

B magnetická indukce

l délka vodiče cívky

v rychlost kmitání pouzdra snímače



Obrázek 6: Princip snímače rychlosti [20]

Principiálně tento snímač měří amplitudu kmitavého pohybu, ale při mechanicko-elektrické transformaci signálu se vyhodnocuje rychlost kmitání jeho pouzdra, z důvodu vnitřního uspo-

řádání snímače. Obecně snímače rychlosti mají vlastní rezonanční frekvenci, která se pohybuje mezi 5 Hz až 10 Hz, tzn. měření je možné od této frekvence, pokud je vhodně nastaveno tlumení. Nevýhodou elektrodynamických snímačů jsou omezená horní měřicí frekvence na 3,5 kHz a velká citlivost na okolní magnetická pole. Z toho důvodu jsou náchylné k nejistotám. V současné době se k určení rychlosti vibrací používají akcelerometry s následným přepočtem zrychlení na rychlost.

2.3.3 Snímače zrychlení

Na rozdíl od předchozích dvou typů snímačů mají tyto snímače velkou tuhost k oproti zanedbatelné hmotnosti m a tlumení b a modelovou rovnici lze upravit na vztah (6). Jak již bylo řečeno, tyto snímače v dnešní době převažují vzhledem k velkoplošné výrobě polovodičových technologií a digitalizaci zpracování signálů a komunikace.

$$ky = M\ddot{x} \Rightarrow y \approx \ddot{x} \quad (6)$$

Základní principy, které se běžně využívají, jsou piezoelektrický akcelerometr, kapacitní MEMS akcelerometr a piezorezistivní MEMS akcelerometr.

Při montáži akcelerometrů je nutné zkontrolovat poměr hmotnosti měřeného objektu m_O a hmotnosti akcelerometru m_A . Doporučený poměr pro správné měření (aby hmotnost snímače neovlivnila vlastní kmitočet a zrychlení objektu) je $\frac{m_O}{m_A} > 10$.

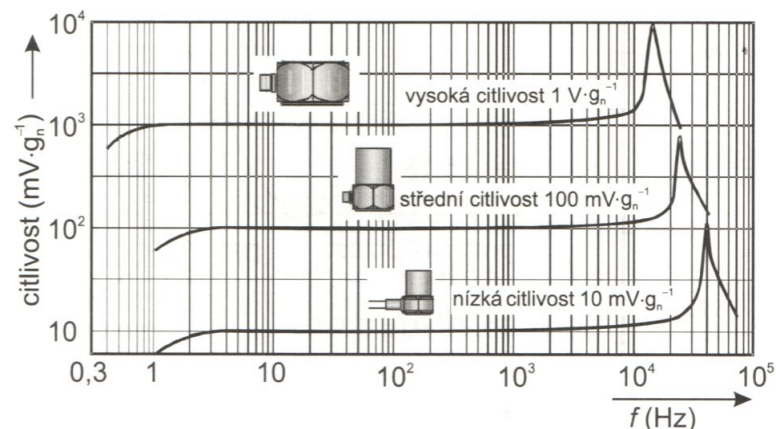
Piezoelektrické akcelerometry

Tento typ akcelerometrů pracuje na principu piezoelektrického jevu. Při deformaci vzniká elektrický signál úměrný zrychlení. Použitelné frekvenční pásmo je od několika Hz do cca 40 kHz. Frekvenční charakteristika a odpovídající frekvenční rozsah jsou závislé na seismické hmotnosti snímače. Zvýšením hmotnosti dochází k poklesu hodnoty vlastního úhlového kmitočtu a tím narůstá citlivost akcelerometru. Na druhé straně se zvětšením hmotnosti omezí frekvenční rozsah snímače. Z toho vyplývá, že vysoce citlivé akcelerometry mají nižší horní mez frekvenčního pásma (Obrázek 7).

Výhodou je odolnost proti vysoké teplotě a mechanickému namáhání. Jejich konstrukce je nejčastěji řešena se smykovým namáháním piezokrystalu. Další, méně častá, možnost je řešení tlakovým namáháním.

Tlakový typ akcelerometru je oproti smykovému náchylný na parazitní namáhání, které může být způsobeno např. teplotními změnami nebo příliš velkým utahovacím momentem při šroubovém upevnění snímače. Tímto nežádoucím namáháním může dojít k deformaci základny a tím ke vzniku falešného signálu.

Smykový typ je v současné době vyráběn jako např. delta-shear, jehož konstrukce spočívá v uspořádání tří piezokeramických elementů do trojúhelníku. Tyto elementy jsou orientovány tak, aby je deformace základny ovlivňovala co nejméně. Srovnání těchto dvou typů je v tabulce pod textem. [1, 3]



Obrázek 7: Typické frekvenční charakteristiky pro různé citlivosti piezoelektrických akcelerometrů [1]

Tabulka 2: Srovnání typů akcelerometrů [3]

| | Smykový | Tlakový |
|---|--|--|
| | | |
| + | Široký frekvenční rozsah Relativní odolnost Nízká náchylnost na teplotní změny | Široký frekvenční rozsah Odolnost vůči rázům |
| – | Nížší citlivost | Náchylnost na teplotní změny Náchylnost na deformaci základny |

V současné době je piezoelektrický akcelerometr smykového typu nejpoužívanějším snímačem absolutních vibrací.

Kapacitní MEMS akcelerometry

Principem těchto akcelerometrů je měření kmitání/výchylky mikrometrové mechanické soustavy. Při pohybu seizmické hmoty dochází ke změně kapacity pohyblivých elektrod vůči pevným elektrodám. Jedna kapacita se zmenšuje a druhá se zvětšuje, a proto se vyhodnocuje rovnou jejich rozdíl. Tento typ senzorů je velice odolný a spolehlivý, jelikož vyhodnocovací obvody i měřicí struktura jsou uloženy v integrovaném obvodu. [19, 20]

Uspořádání založené na MEMS technologii předpokládá přítomnost tzv. seizmické hmotnosti m , která je z polykrystalického křemíku. Uvedená hmotnost je ve tvaru hřebínku a je zavěšena pomocí dvou pružných upevnění k monokrystalickému substrátu. Soustava diferenč-

ních kapacitních senzorů obsahuje jednu pohyblivou (X) a dvě pevné elektrody (Y, Z). Pohyblivé elektrody představuje každý z 50 zubů hřebínku. Na ty je přivedeno napětí z demodulátoru SD, což vyvolá elektrostatický silový účinek, který kompenzuje působení měřeného zrychlení. [1]

Frekvenční pásmo je od 0 Hz až do cca 6 kHz, dynamický rozsah do 250 g, dají se použít i pro nízké dynamické rozsahy akcelerace. Na rozdíl od piezoelektrických akcelerometrů jsou méně odolné proti vyšším teplotám. [20]

Piezorezistivní MEMS akcelerometry

Princip těchto akcelerometrů je založen na piezorezistivním jevu. Tento jev popisuje vliv krystalografické orientace hmoty na rezistivitu materiálu. Piezorezistivní elementy jsou nejčastěji složeny do podoby Wheatstoneova můstku a jejich odpor se mění namáháním ohybem. Akcelerometry tohoto typu měří amplitudu zrychlení a pracují v podrezonanční oblasti. Frekvenční pásmo je od 0 Hz do 7 kHz a dynamický rozsah se pohybuje od 1,5 g do 2 000 g. Oproti ostatním akcelerometrům mají tyto nejvyšší poměr citlivost/hmotnost (do 25 mV/g). Napěťová citlivost je stabilní, a proto jsou vhodné k dlouhodobému měření, avšak jsou teplotně závislé. [1, 19, 20]

2.4 Uchycení snímačů

Přípevnění snímače např. na skříň stroje je důležitým aspektem. Každý snímač měří to, co se děje s ním samotným. Jak již bylo popsáno v kapitole 2.2, absolutní vibrace vyjadřují pohyb sledovaného tělesa vzhledem k zemskému souřadnému systému. Měření relativních vibrací předpokládá uměle vytvořenou základnu. Tou může být např. rám stroje, který sám o sobě kmitá vzhledem k Zemi. Příklad dostupný na [19] popisuje situaci, kdy je hřídel uložena v kluzných ložiscích, a tak její kmitý utlumí vazivo. Tím pádem sledované vibrace není možné změřit. Z tohoto důvodu je třeba zvolit relativní snímač kmitů hřídele proti rámu, aby bylo možné analyzovat toto kmitání. V závislosti na situaci by mohla existovat potřeba měřit také absolutní vibrace rámu. Proto je důležitá i volba místa instalace snímače, aby tuhost či pružnost stroje nedodávala zkreslení chvění nebo frekvence.

Uchycení snímače má vliv mj. na možný měřicí frekvenční rozsah. Je několik možností připevnění: šrouby, lepicí páska, včelí vosk nebo magnet. Srovnání jednotlivých možností je na obrázku 8. Pro maximální využití frekvenčního rozsahu je nejlepší uchycení pomocí závrtných šroubů, popř. šroub přilepený speciálními lepidly (zubní cement nebo kyanoakrylátová lepidla). Další z možností je včelí vosk, se kterým je také možné dosáhnout dobrých výsledků při laboratorním měření. Nejproblematictější jsou snímače s magnetickým přichycením nebo snímače s ručním hrotem. Detailnější popis způsobů uchycení je v následujících podkapitolách. [1, 3, 13]

Šroub

Jedná se o nejspolehlivější způsob uchycení, co se týče kvality získaného signálu, protože zanedbatelně snižuje použitelný frekvenční rozsah. Pro dosažení nejlepšího výsledku, musí být plocha pod základnou snímače čistá a rovná a musí na ni snímač dosedat celou plochou základny. Závrtový otvor musí být kolmý k měřenému povrchu a dostatečně hluboký. Požadavky na jeho

opracování a kvalitu jsou přísné a na hotových strojích se těžce dodržují. Z tohoto důvodu se v praxi používají lepené podložky z nerezavějící oceli.

Lepidlo

Požadavky pro tento způsob uchycení snímače jsou čistá a zdrsňená plocha pro nalepení a vhodné lepidlo. Pokud není použito doporučené lepidlo, může se stát, že významně sníží frekvenční rozsah. Takováto lepidla mají totiž měkkou doplňkovou složku pro vyrovnání nerovností. Samotný snímač není obvykle lepen přímo na stroj, aby případné demontáži nedošlo k poškození. Snímač se proto lepí na podložky se závitem pro šroub. Pozor se musí dát na maximální provozní teplotu, aby nedošlo k změknutí lepidla. Ta se pohybuje mezi 80 °C a 100 °C.

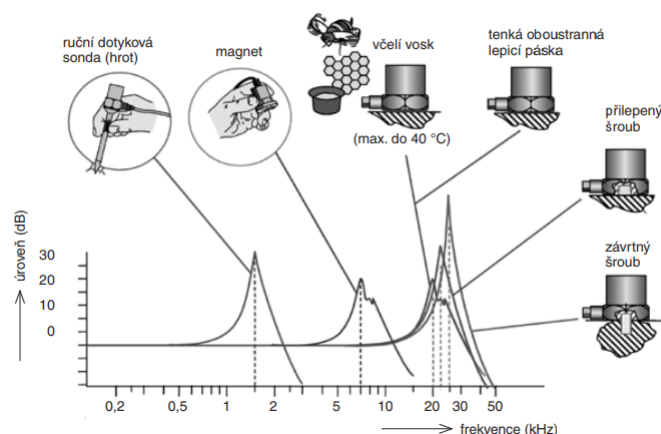
Magnet

Uchycení magnetem je vhodné pro běžná provozní měření, která se pohybují ve frekvenčním rozsahu do 2 kHz. Plocha, na kterou snímač dosedá, musí být čistá, rovná, bez barvy apod. Pro tento způsob uchycení jsou použity speciální magnety ze vzácných zemin, které jsou silnější než běžný magnet. Je to častý a rychlý způsob.

Včelí vosk

Dalším rychlým způsobem uchycení je použití včelího vosku. V diagnostice se neuplatňuje. Používá se zejména pro laboratorní měření a menší snímače z důvodu omezeného frekvenčního rozsahu a nízké provozní teploty, která je do 40 °C.

Dalšími možnými způsoby je např. dotyková jehla, která je určena pro orientační měření do 1 kHz, nebo oboustranná lepicí páska, která je méně spolehlivá a její použití není běžné.



Obrázek 8: Vliv způsobu uchycení na amplitudovou frekvenční charakteristiku [1]

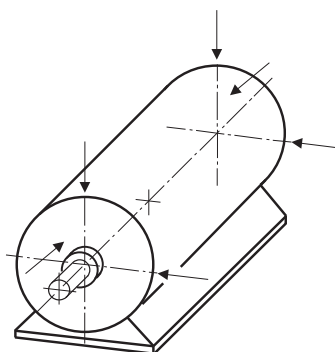
2.5 Měřicí místa

Měřicí místa a jejich počet se liší na základě měřeného stroje. Rozlišuje se měření na nerotujících částech a měření na rotujících hřídelích (absolutní a relativní). Tato práce je zaměřena na měření na nerotujících částech, a proto je tato problematika dále rozvedena.

Měřicí místa na nerotujících částech

Místa by měla reagovat na dynamické síly, které se přenáší z rotujících částí a tím pádem reprezentují celkové vibrace stroje. Tato místa jsou například ložiska, nosné ložiskové skříně nebo jiné konstrukční části. Při instalaci stroje a přejímacích zkouškách je třeba provést měření v každém měřeném místě ve třech vzájemně kolmých směrech. Tato umístění zobrazuje norma „ČSN ISO 20816-1. Vibrace – Měření a hodnocení vibrací strojů – Část 1: Obecné pokyny.“

V případě provozního monitorování stačí, pokud je provedeno měření na jednom, popř. obou, místech v radiálním směru. V obvyklých případech to je horizontální příčný nebo/a vertikální směr. Příklad měřicích míst a směrů je na obrázku 9.



Obrázek 9: Měřicí body a směry na malých elektrických strojích, upraveno: [9]

2.6 Kabeláž

Pro kvalitní přenos signálu z akcelerometru do analyzátoru je nutno použít vhodnou cestu, aby naměřená data nebyla znehodnocena okolními vlivy. Takovými vlivy jsou v průmyslovém provozu především silná elektromagnetická pole. Při suchém tření také vzniká statická elektřina a může být dalším z okolních vlivů. Aby se předešlo znehodnocení dat, jsou používány speciální stíněné kabely. Uzemnění stínění ale musí být pouze na jednom konci, jinak by mohlo dojít k uzavření tzv. zemní smyčky. Tyto problémy jsou nepříznivé hlavně u vícekanálových měření, tzn. umístění snímačů na různé části stroje s různým statickým potenciálem (paralelní měření). Zabránění vzniku zemní smyčky je řešeno použitím snímačů s izolovanou základnou. Pokud nejsou takovéto snímače k dispozici, existuje možnost izolovaných šroubů a slídových podložek pod akcelerometry.

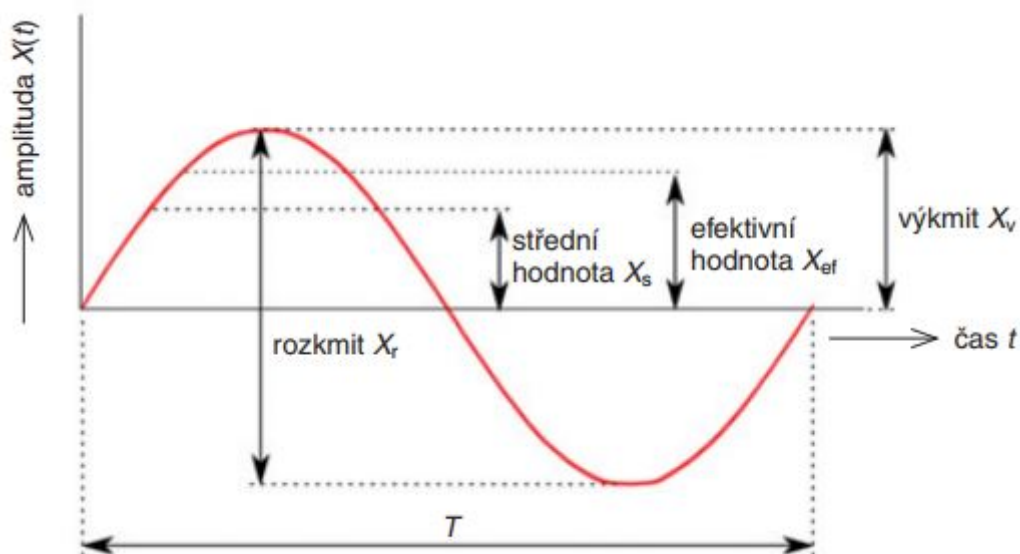
2.7 Analýza signálu

Analýzu signálu je možné provádět jak v časové tak frekvenční oblasti. Zatímco časová oblast slouží pouze pro monitorování stavu vibrací, z frekvenční oblasti je možné zjistit příčinu změny vibrací. Tato práce je zaměřena na monitorování stavu vibrací v čase. Pro podrobnější

diagnostiku měřeného průběhu je potřeba udělat analýzu ve frekvenční oblasti. Tato část byla zpracována a z důvodu rozsáhlosti tématu byla vložena jako Příloha IV.

2.7.1 Časová oblast

Hodnoty parametrů signálu kmitavého pohybu se mění v čase. Vhodnými charakteristikami pro hodnocení jsou výkmit nebo rozkmit. Celkový energetický obsah signálu potom určují efektivní a průměrná hodnota. Demonstrativně je toto zobrazeno na obrázku 10, kde je ideální harmonický signál s kruhovou úhlovou rychlostí. Tento signál popisuje vztah (7)



Obrázek 10: Harmonický signál s kruhovou úhlovou rychlostí [19]

$$X(t) = X_v \sin \omega t \quad (7)$$

$X(t)$ amplituda – okamžitá hodnota sledovaného parametru v čase t

X_v výkmit (špičková hodnota) – maximální vzdálenost vrcholu vlny od referenční hodnoty

X_r rozkmit (špička-špička) – maximální vzdálenost protilehlých vrcholů vlny

X_s střední hodnota – průměrná hodnota amplitudy v průběhu půlvlny

X_{ef} efektivní hodnota (RMS)

T perioda

Efektivní hodnota se využívá v diagnostických předpisech jako objektivní hodnota pro posouzení stavu stroje a je určena podle vztahu (8)

$$X_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (8)$$

V rámci časové oblasti se vyhodnocují parametry časového průběhu signálu určujících veličin. Určujícími veličinami se rozumí výchylka, rychlost nebo zrychlení. Časová analýza má smysl, pokud existuje pouze jeden nebo alespoň dominantní zdroj vibrací. Pokud by zdrojů bylo více, z ostatních oblastí stroje, ztratila by se žádaná informace v šumu. Náповědu pro vyhodnocení takového signálu obsahuje norma ČSN ISO 10816, která umožňuje hodnocení stavu stroje na základě velikosti vibrací nebo změně velikosti vibrací. [1, 3]

Celkové vibrace

Hodnocení parametru velikosti vibrací představuje rychlou a jednoduchou variantu vibro-diagnostiky. Další výhodou jsou nízké pořizovací náklady. Nevýhodou je naopak velmi omezená možnost identifikace příčiny vibrací stroje (pro tuto informaci se provádí analýza ve frekvenční oblasti – Příloha IV). Vyhodnocení probíhá porovnáním naměřené hodnoty s normou a s měřeními, které byly provedeny v bezporuchovém stavu. Měření se provádí ve třech směrech a nejvyšší naměřená hodnota se nazývá mohutnost vibrací (podrobnější informace viz kapitola 2.5). Norma ČSN ISO 20816 definuje mezní hodnoty mohutnosti, které určují 4 pásma, do kterých stroj spadá dle naměřených hodnot. Meze pásem se liší na základě typu stroje (jeho výkonu) a příklad takových mezí je uveden v tabulce pod textem. Jak již bylo řečeno, není možné definovat přesné hodnoty obecně pro všechny stroje, tyto informace je třeba získat zkušenostmi nebo dohodou s dodavatelem. Příklad uspořádání vibrometru celkových vibrací je na obrázku 11. [1, 3]

Tabulka 3: Orientační meze vibrací stroje v pásmu (10-1000)Hz [3]

| v_{ef} (mm/s) | < 15 kW | (15–75) kW | >75 kW pevné nepoddajné | >75 kW pevné poddajné |
|--------------------|---------|------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 0,28 | A | A | A | A |
| 0,45 | | | | |
| 0,71 | | | | |
| 1,12 | B | B | B | B |
| 1,8 | | | | |
| 2,8 | C | C | C | C |
| 4,5 | | | | |
| 7,1 | D | D | D | D |
| 11,2 | | | | |
| 18 | | | | |
| 28 | | | | |
| 45 | | | | |

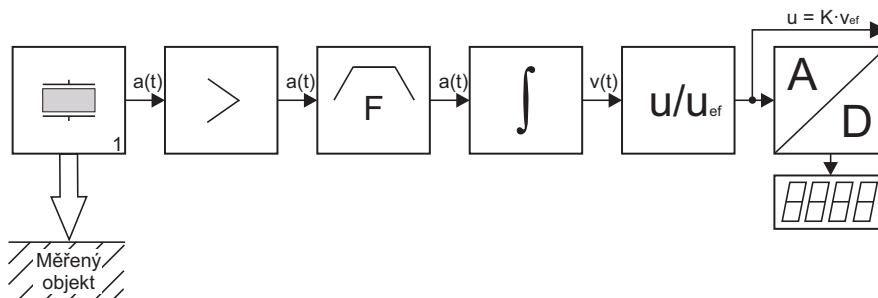
Pásmo A – nové nebo nedávno prověřené stroje

Pásmo B – přípustné vibrace v neomezeném provozu, stroje mohou být provozovány neomezeně dlouhou dobu

Pásmo C – vibrace na mezi přípustnosti, stroje jsou považovány za neuspokojivé pro dlouhodobý a trvalý provoz, mohou být provozovány do doby, než se opraví

Pásmo D – nepřípustné vibrace, mohou vyvolat poškození stroje

Hranice pásem nelze striktně dodržovat, slouží jako vodítka a zkušenostmi výrobce nebo provozovatele mohou být upraveny. Celkově napomáhají provést rozhodnutí o dalším provozu stroje a navržení eventuálních opatření. Je důležité uvědomit si, že norma toto rozdělení stanovuje pro frekvenční pásmo 10 Hz až 1000 Hz, protože zde se pohybuje většina informací o strojích. Pokud by stroj nesplňoval tento rozsah, a měl např. nižší otáčky, doporučuje se, aby byla dolní mez pod 1/3 otáčkové frekvence. Z tohoto důvodu je třeba ve zprávě o měření uvést nastavený frekvenční rozsah. [3]



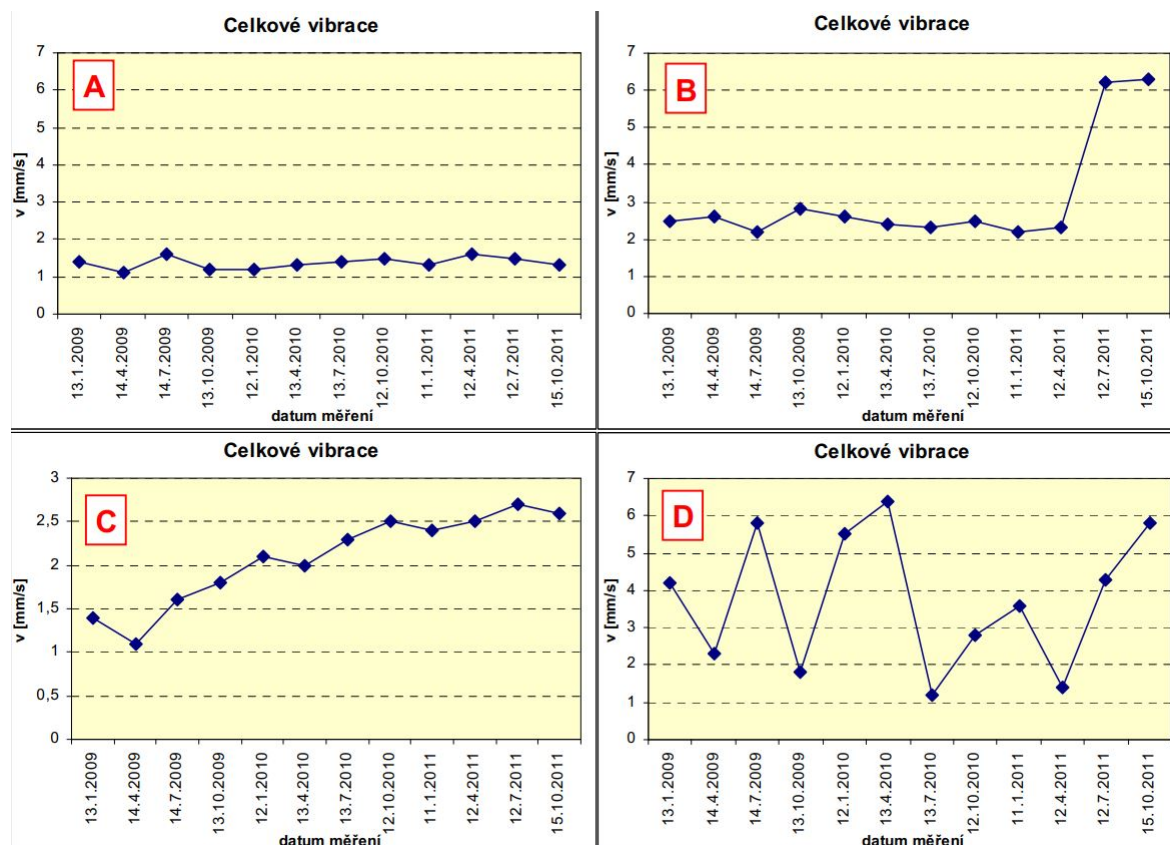
Obrázek 11: Blokové schéma vibrometru celkových vibrací
1 – piezoelektrický akcelerometr, F – širokopásmový filtr, upraveno: [1]

Změna vibrací

Hodnocení podle tohoto kritéria požaduje dlouhodobé sledování. Posuzují se změny velikosti vibrací vůči dané referenční hodnotě. Ta je stanovena za ustálených provozních podmínek při dobrém provozním stavu stroje. I když vibrace nedosáhnou velikosti, která by napovídala závadě, podle kritérií v předchozí kapitole, může být změna velikosti tak výrazná nebo náhlá, že to může být indikátor závady a následně vhodného opatření. Příklady takového chování jsou na obrázku 12.

V případě, že stroj pracuje, jak má, jsou vibrace stálé, což zobrazuje graf A. Graf B popisuje situaci, kdy dojde k náhlé změně velikosti vibrací a to znamená, že došlo k nenadálé závadě, např. odlomení části zařízení nebo poruše. Místo nárůstu může dojít i k náhlému poklesu. Například pokud je setrvalý stav způsoben nevyvážeností, náhlý pokles vibrací může indikovat odlomení části zařízení.

Postupné poškození (opotřebení) zobrazuje graf C. Nesmyslný trend na grafu D je způsoben např. nevhodným místem k měření, špatným uchycením snímače apod. [1, 3]



Obrázek 12: Trendy celkových vibrací [3]

2.8 Měření vibrací na elektromotorech

Na elektromotorech může být provedeno dvojí měření. Bezdotykovými snímači, které slouží pro měření u rotujících hřídelí, kdy se měří indukčními, kapacitními snímači nebo sondami na vířivé proudy. Druhou možností jsou seismické snímače (většinou akcelerometry) pro měření na nerotujících částech. Pro správné měření, respektive vyhodnocení, je třeba znát provozní informace o stroji.

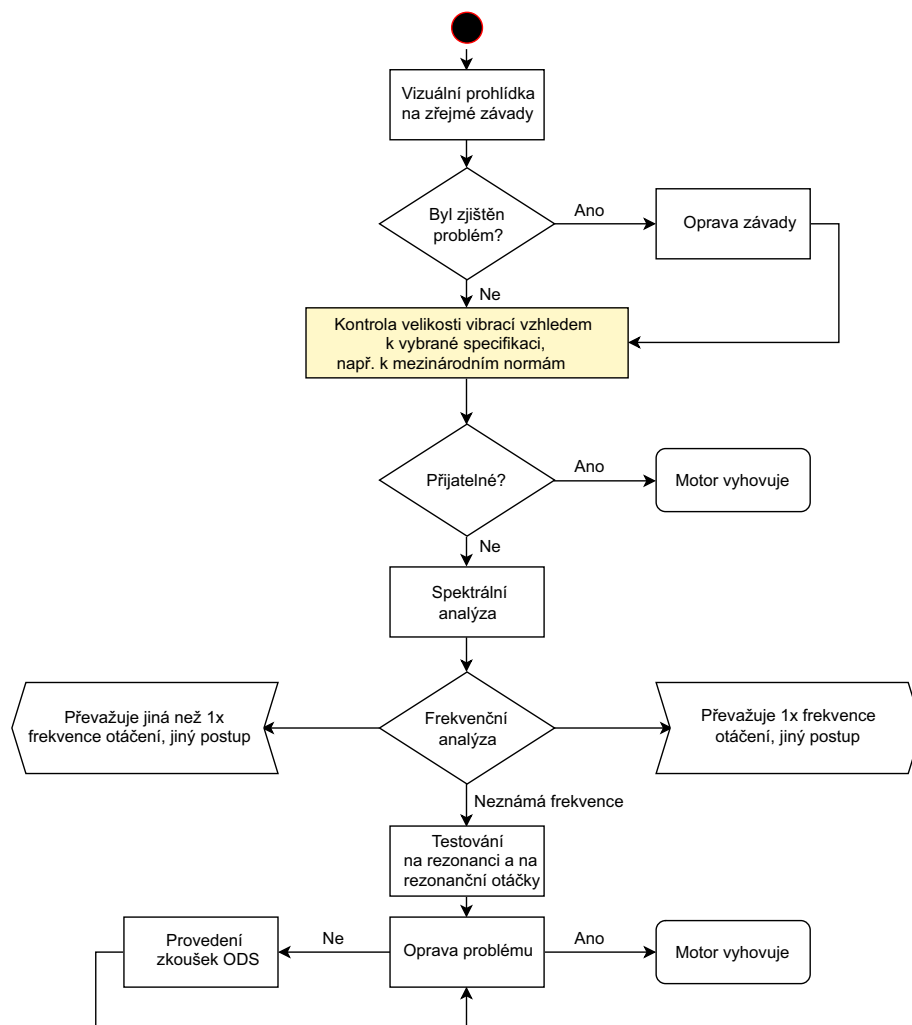
Provozní parametry, které mohou mít vliv na vibrace stroje:

- otáčky
- zatížení
- vertikální X horizontální orientace motoru
- tuhé X pružné upevnění
- teplota

Pro analýzu je vypracován systematický přístup, který popisuje [7], příloha A. V tomto segmentu se nalézá tabulka s otázkami, které mají napomoci zjistit všechny potřebné informace

o stroji, jako je bezpečnost, historie, přítomnost vibrací i jejich závažnost apod. Důležitými parametry jsou také upevnění motoru, vibrace přenášené od okolních strojů, konstrukce budovy atd. Dalším pomocným dokumentem je systematický přístup v [8], příloze A. Zde jsou v tabulce popsány možné závady a jejich vliv na vývoj vibrací a chování stroje. V příloze B této normy jsou popsány vývojové diagramy, které zobrazují metodologii vibrační diagnostiky. Počáteční postup diagnostiky vibrací je zobrazen na diagramu pod textem. 13

Tato práce je zaměřena na část kontroly velikosti vibrací, kdy se tato veličina bude měřit kontinuálně a dlouhodobě a při výskytu problému se provede spektrální analýza.

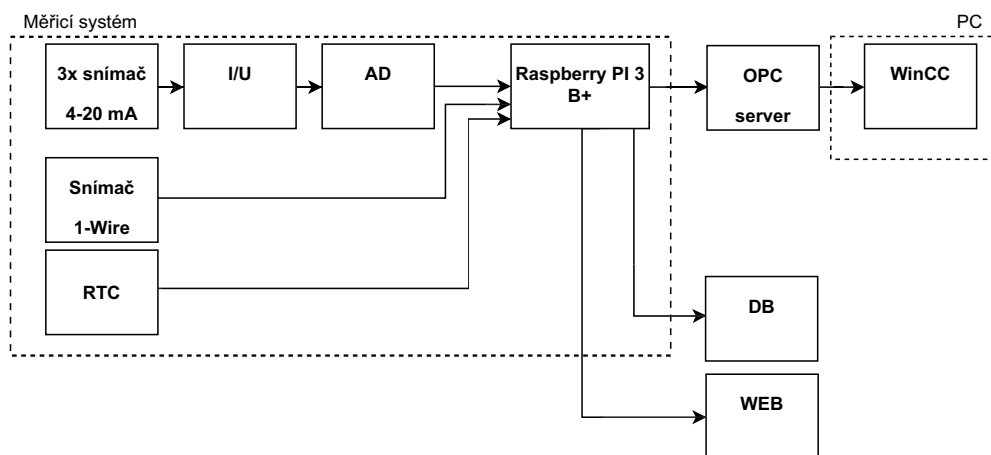


Obrázek 13: Vývojový diagram vibrační diagnostiky elektromotorů. Vyznačená část představuje část procesu, jehož řešením se zabývá tato práce, upraveno: [8]

3 Analýza požadavků a měřicí řetězec

Cílem práce bylo vytvoření samostatného zařízení pro měření provozních veličin. Toto zařízení by mělo být přenosné, modulární a mělo by splňovat požadavky jednotlivých provozů. Rámec práce byl zaměřen na měření teploty a vibrací, avšak hardwarové i softwarové řešení je připraveno na připojení jakýchkoli 3 senzorů s výstupem (4 – 20) mA a jednoho senzoru s datovou sběrnici OneWire. Z důvodu rozmanitosti technologického řešení koncových míst bylo třeba vytvořit několik alternativ zpracování a zobrazení dat.

Platformou pro řízení celého systému bylo zvoleno Raspberry Pi 3 B+, které je ideálním kandidátem vzhledem k jeho velikosti, hmotnosti a dostatečnému výpočetnímu výkonu. Nevýhodou je absence analogových vstupů, a proto bylo potřeba vytvořit dodatečný hardware pro transformování proudového signálu ze senzoru na digitální signál. Tento proces popisuje 4.1. Použité snímače jsou snímač vibrací VKV022 od firmy IFM a sondu s teplotním čidlem DS18B20 od firmy Maxim Integrated.



Obrázek 14: Schéma měřicího řetězce

Monitor vibrací

Vybraným snímačem je VKV022 od firmy IFM. Jedná se o MEMS průmyslový snímač s napájecím napětím (18 – 32) V a s přesností $\pm 3\%$. Frekvenční rozsah snímače je (10 – 1000) Hz. Výstupem je proudová smyčka (4 – 20) mA, která odpovídá RMS hodnotě rychlosti vibrací v rozsahu (0 – 50) mm/s. Pracovní teplota se pohybuje od -25°C do $+80^{\circ}\text{C}$ a stupeň krytí je IP67 (prachotěsnost, ponoření do hloubky 1m na méně než 30 min).



Obrázek 15: Monitor vibrací VKV021 od firmy IFM

Teplotní sonda

Pro měření teploty byla vybrána sonda, která obsahuje teplotní čidla DS18B20 od firmy Maxim Integrated. Čidlo má napájecí napětí od 3 V do 5,5 V a přesnost $\pm 0,5\%$, což je pro orientační měření plně dostačující. Rozsah měření teploty je $(-55 - +125)^\circ\text{C}$. Kabel je dlouhý 1 m a stupeň krytí je IP67.



Obrázek 16: Sonda s teplotním čidlem DS18B20 od firmy Maxim Integrated

Zpracování dat a vizualizace

Z důvodu požadavku na přenosné zařízení je třeba brát v potaz jaké podmínky zpracování a vizualizace dat jsou na jednotlivých provozech komplexu. Varianty, ke kterým může dojít, jsou tři:

- na místě je připojení do sítě a je přístup ke SCADA
- na místě je připojení do sítě, ale není přístup ke SCADA
- na místě není vůbec přístup k síti

V prvním případě je vizualizace provozu řešena přes WinCC a je požadováno, aby data z vyvíjeného zařízení bylo možné zobrazit v tomto prostředí. Tohoto bude dosaženo vytvořením OPC serveru na Raspberry Pi, ze kterého může data WinCC vyčítat a zobrazovat. Další možností pro zobrazení dat je vytvoření webové aplikace, na kterou bude přístup při připojení k technologické síti. Pokud na místě není připojení do sítě, není možné online zobrazování dat a budou se ukládat do databáze, pro pozdější zobrazení.

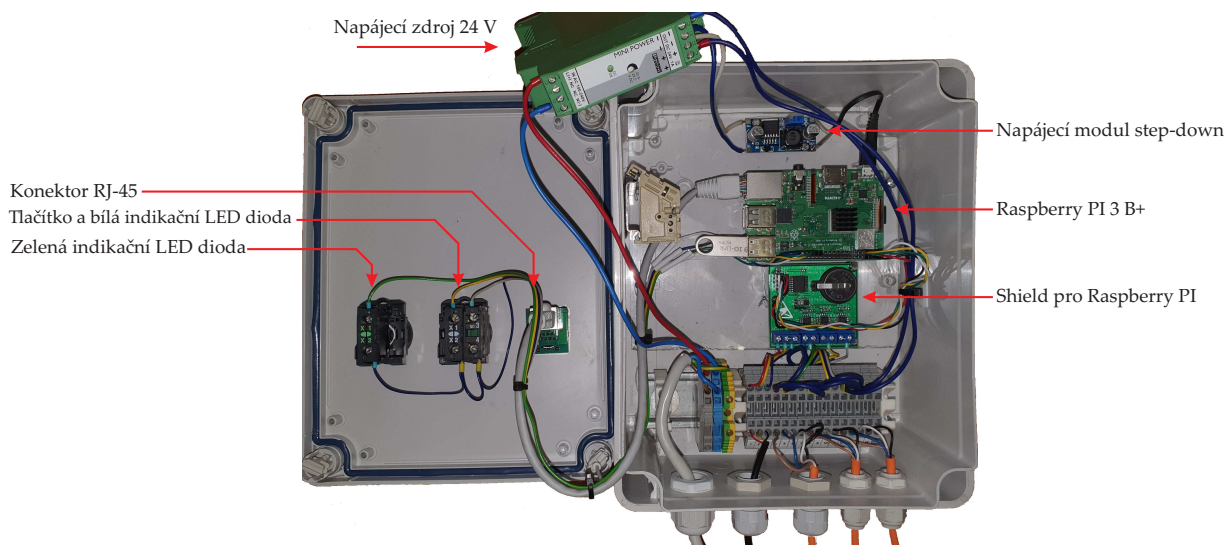
Pro naprogramování softwarové části byl vybrán CODESYS Development System s rozšířením CODESYS Control for Raspberry Pi SL, které umožňuje programovat Raspberry Pi jako PLC. Vývojové prostředí podporuje připojení I²C, SPI a 1-Wire zařízení, vytvoření OPC UA serveru, databáze, čímž se stává řešením, které splňuje veškeré požadavky zadaného problému.

4 Návrh a realizace HW

Bylo vytvořeno samostatné zařízení pro měření provozních veličin. Zařízení je přenosné, modulární v rámci průmyslových senzorů, má krytí IP55 (chráněno částečně před prachem a proti tryskající vodě). V rámci obsluhy zařízení je umožněn přístup pouze k vypínacímu tlačítku a připojení ethernetového kabelu. Připojení kabeláže senzorů vyžaduje otevření pouzdra a připojení ke svorkovnici. Výsledné zařízení se skládá z jednotlivých hardwarových částí, které jsou popsány v této kapitole. Jedná se o:

- Raspberry PI
- shield pro Raspberry PI
- obslužné a indikační prvky
- napájecí zdroj

Raspberry PI, shield a napájecí modul pro Raspberry PI jsou připevněny k distanční podložce, která je upevněna ke dnu krytu.



Obrázek 17: Popis výsledného zařízení

4.1 Shield pro Raspberry PI

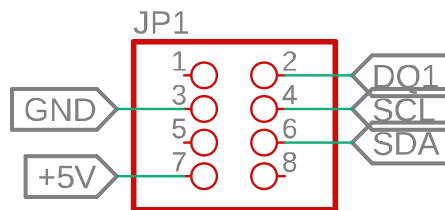
Pro řešení zadání bylo potřeba vytvořit desku plošných spojů, která by obsahovala všechny důležité komponenty měřicího řetězce, které Raspberry PI neobsahuje. Jedná se o hodiny reálného času, I/U převodník, A/D převodník a zapojení pro připojení teplotního senzoru. V této kapitole jsou podrobně popsány jednotlivé segmenty a celková navržená deska. Schéma a deska byly navrženy v programu EAGLE 9.2.0.

Schéma zapojení DPS

Celé schéma je možné nalézt v Příloze I. Ve schématu se nachází:

- konektor 4x2 pro připojení k Raspberry PI
- zapojení A/D převodníku
- 3x zapojení I/U převodníku
- zapojení pro připojení teplotního čidla
- hodiny reálného času
- blokovací kondenzátory

Připojení k pinům Raspberry PI je připraveno přes konektor 4x2, což stačí pro připojení ke všem potřebným pinům. Potřebnými piny se rozumí napájení, GND, SDA a SCL piny pro I²C a digitální vstup pro přenos dat přes sběrnici OneWire z teplotního senzoru.



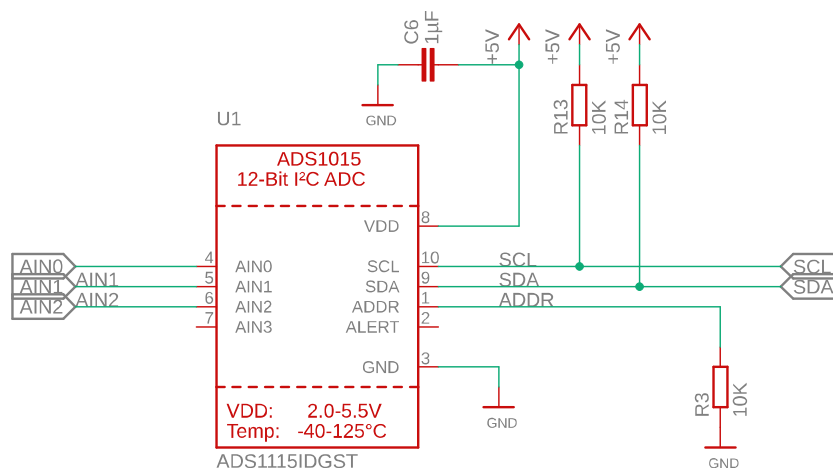
Obrázek 18: Konektor 4x2 pro připojení k Raspberry PI

K SDA a SCL výstupům z A/D převodníku jsou připojeny pull-up rezistory. Když není připojeno žádné zařízení je na výstupu logická 1 (HIGH), při připojení zařízení je na výstupu logická 0 (LOW). Ke každému integrovanému obvodu je připojen blokovací kondenzátor o hodnotě 1 nF, který je připojen mezi napájení a GND.

A/D převodník

Vibrační senzor VKV022 má analogový výstup. Raspberry PI ovšem nedisponuje analogovými vstupy, proto bylo třeba navrhnout A/D převodník, který by analogový signál ze senzoru zdigitalizoval. Pro toto řešení byl vybrán převodník ADS1115 od firmy Texas Instruments. Jeho napájecí napětí je (2,2-5,5) V. Má 3 napěťové vstupy, které jsou připraveny pro připojení tří senzorů instrumentace. Výstupem jsou SDA a SCL porty pro I²C přenos do Raspberry PI. Tyto porty jsou propojeny s napájením přes pull-up rezistory o hodnotě 10 k Ω .

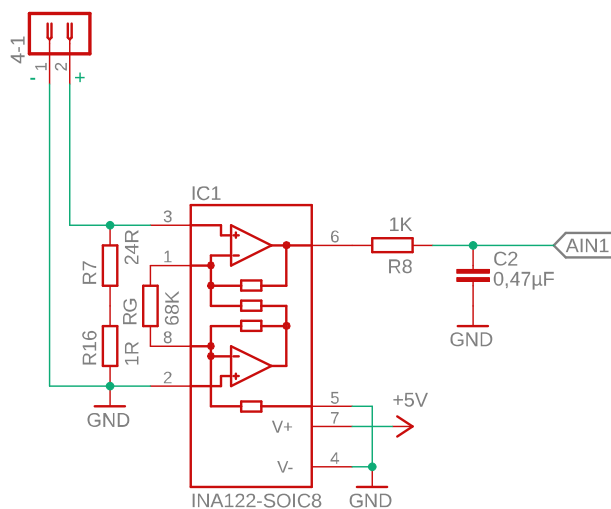
Dalším portem je ADDR, kde je možnost nastavit I²C adresu zařízení podle toho, na který pin (GND, VDD, SDA, SCL) je připojen. V tomto případě, kdy je připojen k zemi, je jeho adresa 0x48.



Obrázek 19: Zapojení A/D převodníku s ADS1115

I/U převodník

Výstupem z použitého senzoru vibrací (3) je proud v rozmezí 4–20 mA. Toto rozmezí reprezentuje mohutnost vibrací. Z důvodu, že A/D vyžaduje napěťové vstupy, bylo třeba navrhnout obvod pro převod proudu na napětí.



Obrázek 20: Zapojení I/U převodníku s INA122

Byl použit operační zesilovač INA122 od firmy Burr-Brown, který je ideální pro přenosné přístroje a systémy pro získávání dat. Jeho napájecí napětí je (2,2 – 36) V. Zesílení se nastavuje hodnotou externího rezistoru, který je připojen na invertující vstupy dvou operačních zesilovačů, které INA122 obsahuje. Jak již bylo řečeno, výstup ze senzoru je (4 – 20) mA. Hodnota rezistoru R_g byla zvolena tak, aby 4 mA odpovídaly 1 V a 20 mA odpovídalo 4 V. Toto by znamenalo, že zesílení bude mít hodnotu 4. Ze vztahu (11) ale vyplývá, že zesílení nemůže mít hodnotu menší než 5. Proto bylo třeba dodat odpor 25 Ω mezi vstupy integrovaného obvodu, který by

snížil hodnoty napětí na polovinu. Hodnota zesílení je tedy 8 a hodnota rezistoru R_g se vypočítala dle vztahu uvedeného v datasheetu. [26]

$$U = R \cdot I = 25 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 0,5 \text{ V}, \quad (9)$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{4}{0,5} = 8, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} G &= 5 + \frac{200\,000}{R_g} \\ 8 &= 5 + \frac{200\,000}{R_g} \\ 8R_g - 5R_g &= 200\,000 \\ R_g &= \frac{200\,000}{3} = 66,67 \text{ k}\Omega, \end{aligned} \quad (11)$$

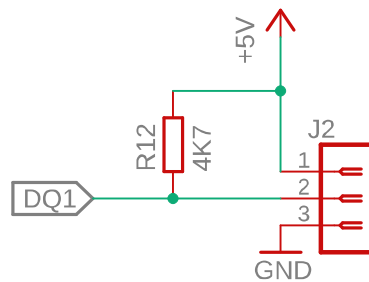
Hodnota rezistoru vyšla 66,67. Z odporové řady byl vybrán rezistor s nejbližším odporem, což odpovídá hodnotě 68k Ω .

Kontrola zesílení pro odpor 68k Ω :

$$G = 5 + \frac{200\,000}{68\,000} \doteq 7,9 \quad (12)$$

Měření teploty

Pro měření teploty byl vytvořen základ pro připojení teplotního čidla DS18B20. Pro komunikaci s Raspberry PI je využita sběrnice OneWire, kterou toto čidlo podporuje. Na desce je připraven konektor pro 3 vodiče pro zapojení s externím napájením. Jeden vodič je připojen k zemi, druhý na napájení a třetí slouží pro sběr digitálních dat ze senzoru. Data jsou poté přenesena na digitální vstup Raspberry PI. Více o teplotním čidlu v kapitole 3.

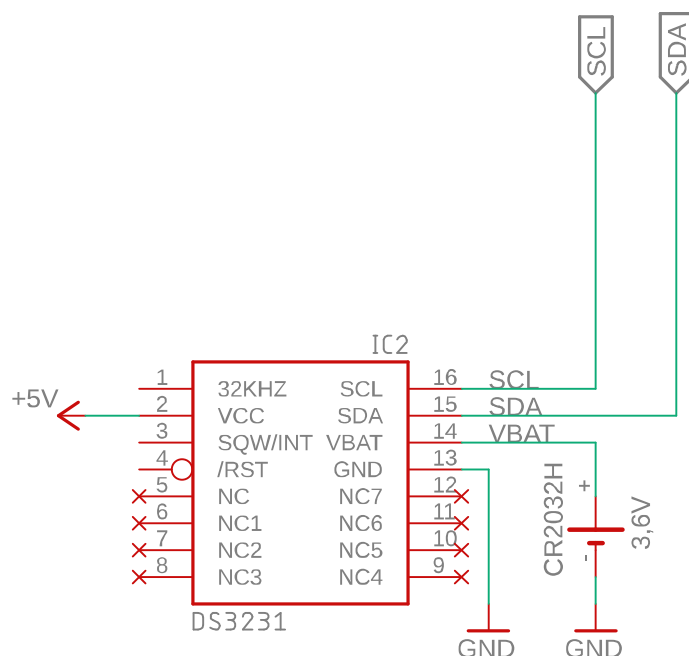


Obrázek 21: Zapojení pro sběr teplotních dat z DS18B20

Hodiny reálného času

Pro správné měření je potřeba znát i čas, kdy byla data nasnímána. Z tohoto důvodu bylo potřeba přidat hodiny reálného času, protože Raspberry PI tento obvod v základu neobsahuje.

Byl vybrán DS3231 od firmy Maxim Integrated. Jeho napájecí napětí je (2,3 – 5,5) V. V případě vypnutí napájecího napětí, je připojena baterie, díky které se uchovávají informace o aktuálním datu a čase. Baterie je knoflíková, 3 V, CR2032. DS3231 je tedy schopen udávat čas a datum, den v týdnu a má kompenzaci pro přestupný rok až do roku 2100.



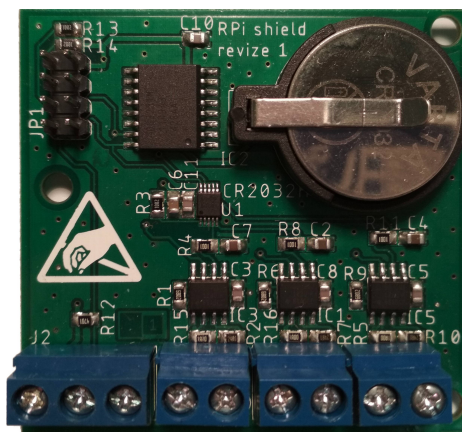
Obrázek 22: Zapojení hodin reálného času s DS3231 a baterií

Deska plošných spojů

Navržená deska má rozměry (55 × 52) mm, je dvouvrstvá s vodivou měděnou vrstvou 35 μ m. Spodní vrstva slouží pro vedení napájecího napětí ke komponentám vyžadujícím 5 V. Šíře cest napájecího napětí je 24 mil, která se zužuje na 12 mil pro připojení k jednotlivým komponentám. Všechny ostatní cesty mají šířku 12 mil kromě cest vedoucích od ADS1115, kde je šíře cest 10 mil. Připraveny jsou, kromě děr pro osazení a upevnění součástek, také montážní díry pro připevnění k distanční podložce. Kromě montážních děr je deska opatřena prokovy pro správné vylití země. Výsledná deska na obrázku 23.

4.2 Obslužné a indikační prvky

Obsluha zařízení je umožněna tlačítkem vyvedeným na povrch zařízení. Tlačítko je, spolu s LED diodou indikující běh Raspberry PI, uloženo v pouzdře. Tlačítko je připojeno na Raspberry PI k pinu 37, označeném jako GPIO26. Jeho funkce je řízena skriptem, který běží na Raspberry PI a je popsán v kapitole 5.1. LED dioda je připojena na pin 35, označený jako GPIO19 a má bílou barvu. Její funkce je opět řízena softwarově.



Obrázek 23: Výsledná DPS

Dalším indikačním prvkem je zelená LED dioda, která značí správný běh programu, tzn. probíhá měření a data jsou zapisována. Tato dioda je připojena k Raspberry PI na pin 33 (GPIO13).

Na víku zařízení je přístupný RJ-45 konektor do panelu, který umožňuje připojení ethernetového kabelu. Konektor je připojen k ethernetovému vstupu Raspberry PI. Tak je možné připojit zařízení k Ethernetu bez nutnosti otevírání pouzdra.

Tlačítko a LED diody jsou uzavřeny v pouzdrech s krytím IP67.

Posledním přístupným prvkem jsou průchodky pro kabely od jednotlivých senzorů a napájení 230 V, jejichž vodiče jsou připojeny do svorkovnice uvnitř zařízení, která je propojena s napájecím zdrojem a svorkami na vytvořený shield. Teplotní čidlo je připojeno třemi vodiči a zapojení je následující: černý vodič = země, červený vodič = napájení, žlutý vodič = data. Senzory vibrací mají připojen hnědý vodič pro napájení +24 V, modrý vodič pro připojení M24 V, který je současně použit jako záporný potenciál proudové smyčky a bílý vodič s kladným potenciálem proudové smyčky.

4.3 Napájecí zdroj

Průmyslové senzory jsou napájeny (18 – 32) V. Pro vytvořené zařízení byl vybrán zdroj od firmy Phoenix Contact MINI-PS-100-240AC/24DC/1. Jedná se o napájecí zdroj k osazení na nosnou lištu, která je součástí výsledného zařízení. Rozsah vstupního napětí je (85 – 264) V AC. Výstupem je stejnosměrné napětí 24 V s jmenovitým proudem 1 A. Jeho výstup je použit pro napájení senzorů a zároveň je přiveden na napájecí modul typu step-down, který toto napětí sníží na hodnotu 5 V, kterými je napájeno Raspberry PI. Napájecí step-down modul je od výrobce GM Electronic s provozní teplotou (-45 – 85) °C a výstupním proudem maximálně 3 A.

5 Návrh a implementace SW

Softwarová část práce je implementována na Raspberry PI. Hlavní a největší částí je program napsaný v prostředí CODESYS s rozšířením Control for Raspberry Pi SL. Zde byla vytvořena knihovna, která umožňuje práci s AD převodníkem, použitým ve stavbě shieldu. Z její stavby vyplývá, že je možná použít pro jakýkoli program, který bude mít za úkol pracovat se senzory s výstupním proudovým signálem (4 – 20) mA. Tato knihovna je dále použita v programu, který slouží k měření vibrací a teploty.

Dalšími softwarovými částmi jsou programy a skripty pro funkci vypínacího tlačítka, indikačních LED diod a připojení USB zařízení. Tato kapitola se zabývá jejich podrobným popisem.

5.1 Inicializace po startu Raspberry PI

Raspberry PI používá soubor config.txt, ve kterém jsou uloženy všechny konfigurační parametry. Soubor je čten dříve, než je načten Linux, je možné do něj zapisovat jako root a nakonfigurovat si tak některá nastavení, např. GPIO pinů. Do tohoto souboru byla zapsána konfigurace pro přenesení funkce aktivní LED diody Raspberry PI na externí LED diodu, která je na ochranném pouzdře výsledného zařízení. Tato dioda tedy slouží k indikaci spuštěného Raspberry PI a je připojena GPIO pin 35. Po jejím zhasnutí je za normálních podmínek bezpečně celé zařízení odpojit od sítě.

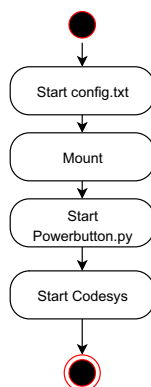
Této konfigurace bylo dosaženo zapsáním následujícího příkazu do souboru config.txt:

```
# dtoverlay=pi3-act-led,gpio19
```

Další funkcí, kterou bylo třeba zajistit, je automatické připojení USB zařízení, které slouží jako externí paměť pro zapisování naměřených dat. Z toho důvodu byl napsán skript, který běží na pozadí a vyčkává na připojení zařízení do USB. Jakmile detekuje zařízení v USB portu provede příkaz „mount“, který zařízení připojí. Skript je napsán tak, aby bylo USB zařízení připojeno jako „/media/usb“. Tato složka je poté použita v hlavním programu jako místo pro ukládání dat.

Pro jednodušší a bezpečnější zacházení se zařízením je doplněno o tlačítko, které umožňuje Raspberry PI vypnout. Z aktivního diagramu na obrázku 24 je vidět, že po zapnutí Raspberry PI je spuštěn program Powerbutton.py. Tento skript je napsán v jazyce Python a běží na pozadí. Jeho funkcí je ovládání tlačítka, které je připojeno na pin 37 (GPIO26) a GND. Po stlačení tlačítka dojde k vypnutí Raspberry a tím pádem celého měření. V rámci skriptu je pin 37 nakonfigurován na vstup s pull-up rezistorem, to znamená, že pokud není stisknuto, je na pinu logická 1, po stisknutí tlačítka je na pinu logická 0. Další část skriptu kontroluje tento stav a při stisknutí tlačítka provede příkaz na vypnutí Raspberry PI:

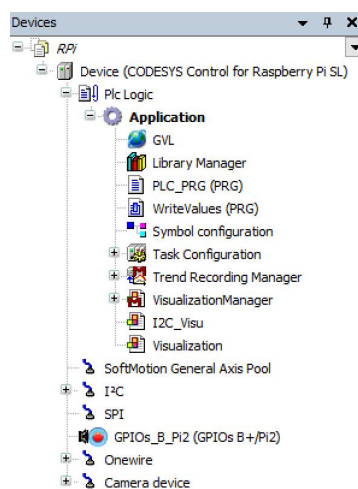
```
# sudo shutdown -h now
```



Obrázek 24: Diagram aktivit po spuštění Raspberry PI

5.2 Program pro měření provozních veličin

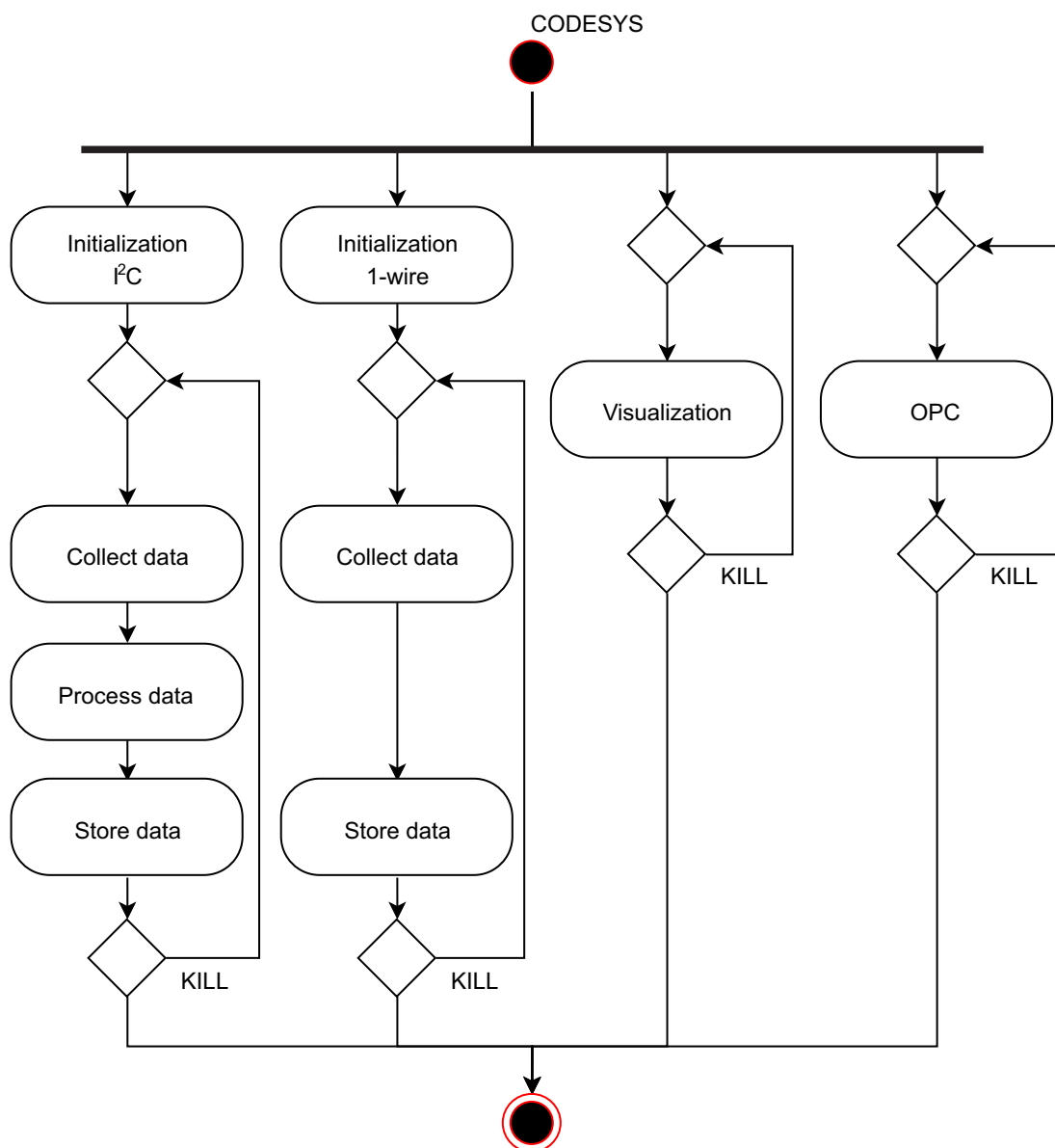
Pro tvorbu hlavního programu byla vybráno prostředí CODESYS V3.5 SP14. Spuštění výsledného programu na Raspberry PI zajišťuje balíček CODESYS Control for Raspberry Pi SL. Nelicencovaná verze má časově omezený runtime, proto bylo zapotřebí zakoupit licenci pro zajištění úplné funkce řešeného programu. V menu vytvořeného projektu je možné zadat zařízení, se kterým se bude pracovat, v tomto případě Raspberry PI. Pod toto zařízení dále spadá PLC Logic s danými programy, připojení dalších hardwarových prvků přes I²C, SPI, Onewire, kamery nebo použití GPIO pinů samotného Raspberry PI.



Obrázek 25: Menu v prostředí CODESYS s připojeným Raspberry PI a jednotlivými programy a zařízeními

K Raspberry PI je možné se připojit pomocí Ethernetu nebo přes Wi-Fi připojení zapsáním IP adresy. Při prvotním připojení je třeba zadat přihlašovací údaje Raspberry PI a nainstalovat na něj zmíněný balíček. Poté už je možné nahrávat do něj napsaný program. Záložka Plc Logic obsahuje hlavní program PLC_PRG, podprogram WriteValues, konfiguraci symbolů, konfiguraci

tasků a vizualizaci. V záložce I²C je přidáno zařízení s názvem ADS_AD1115, které bylo vytvořeno, spolu se svojí knihovnou, pro použitý AD převodník. Postup je popsán v kapitole 5.2.1. Dalším přidaným zařízením je DS18B20 v záložce Onewire. Jedná se o využití teplotní čidlo. Knihovna pro toto čidlo již byla napsána a je oficiálně poskytována firmou 3S–Smart Software Solutions GmbH (Codesys Group). Jednotlivé části jsou popsány dále v této kapitole. Hlavní projekt obsahuje program pro zpracování dat přijatých přes I²C ze zmíněného AD převodníku, informací o teplotě, vizualizaci, řešení OPC serveru a ukládání měřených dat.



Obrázek 26: Diagram aktivit pro program v prostředí Codesys na Raspberry PI

5.2.1 Knihovna pro AD1115

Pro připojení přídavného hardwaru do prostředí Codesys bylo potřeba vytvořit nové I²C zařízení, které zastupuje reálné hardwarové zařízení, a to převodník AD1115. Důsledkem samostatnosti této funkce je možné toto zařízení použít v jakýchkoli řešeních vyžadující převod proudové smyčky (4 – 20) mA na digitální signál. Tento postup zahrnuje dva kroky. Vytvoření zařízení a vytvoření jeho knihovny. Zařízení představuje XML soubor, který obsahuje informace jako jméno, výrobce, verzi daného hardwaru a také název příslušné knihovny. Knihovna obsahuje kód pro obsluhu.

V této části se inicializuje spojení přes I²C komunikaci a zapisují se přijímaná data. Po inicializaci spojení je potřeba zapsat konfiguraci do konfiguračního registru. To představuje 16bit slovo, které udává např. operační stav zařízení, programovatelné zesílení, operační mód, rychlost a informaci o tom, ze kterého ze 3 kanálů se mají data vyčítat. Po nakonfigurování je možné číst data pro daný kanál. Konfigurace se poté mění pro další kanály.

```
CASE _iState OF
0:
    IF usiAddress = 0 THEN
        usiAddress := 16#48;
    END_IF
    IF init() THEN
        _iState := 5;
    END_IF
5:
    writel6(16#01, 2#1100001010000011);
    _iState := 10;
```

Obrázek 27: Ukázka kódu: Konfigurace vyčítání dat pro kanál AIN0

Data z AD převodníku přichází ve formátu od 0 do 32767, což koresponduje s rozsahem vstupního napětí od 0 V do 4 V. V klidovém stavu snímače je jeho výstup 4 mA a to odpovídá hodnotě napětí cca 0,8 V. Hodnota 0,8 V (datová hodnota 6884) je v tomto případě nulová hodnota rychlosti vibrací, proto bylo třeba rozsah upravit o tuto hodnotu. Následující ukázka kódu zobrazuje přepočtení daného rozsahu.

```
IF _iState = 8 THEN
    readregister(00,ADR(aby), 2);

    iAY := UINT_TO_INT(aby[0] * UINT#256 + aby[1]);
    K2 := (iAY- LREAL#6881.28) * LREAL#4.096 / (LREAL#32768 - LREAL#6881.28);

    _iState := 5;
END_IF
```

Obrázek 28: Ukázka kódu: přepočtení rozsahu přijímaných dat z AD převodníku

5.2.2 Měření vibrací a teploty

Tato část programu se zabývá prací s přijatými daty, přípravou souboru pro jejich ukládání na externí USB a obsahuje funkci pro řízení LED diody. Po deklaraci potřebných proměnných je možné s nimi pracovat. Je deklarováno pět proměnných typu REAL, do kterých jsou ukládána zpracovaná data z AD převodníku a z teplotního čidla. Další proměnné jsou potřebné pro tvorbu názvu ukládaného souboru. Z předchozí kapitoly vyplývá, že výstupem z jednotlivých kanálů AD převodníku je napětí v rozsahu (0 – 4) V. Toto napětí bylo třeba přepočítat na hodnotu rychlosti vibrací. Senzor vibrací měří v rozsahu (0 – 50) mm/s, kdy maximální hodnota odpovídá hodnotě napětí 4,096 V (hodnota 4,096 V vychází z nastavení AD převodníku [27]).

```
AD1 := ADS_AD1115.K1 * LREAL#50 / LREAL#4.096;
```

Obrázek 29: Ukázka kódu: Přepočet hodnoty z AD převodníku na rychlost vibrací

Při tvorbě názvu ukládaného souboru jsou využívány proměnné, které nabývají hodnot v programu WriteValues. Jedná se o proměnné obsahující informace o datu a čase. Tyto proměnné jsou poté převedeny na String a spojeny tak, aby daly požadovaný název souboru spolu s příponou .csv. Další proměnnou, která je předávána z programu WriteValues je DataErr typu BOOL, která nabývá hodnoty 1 pokud nedochází k ukládání dat. Negace proměnné DataErr je použita jako indikace pro zelenou LED diodu (4.2), která svítí pokud jsou data ukládána a měření je tedy v pořádku a kompletní. Tato informace je přenesena na digitální výstup QX1.5, který odpovídá pinu GPIO13, na který je uvedena zelená LED dioda připojena.

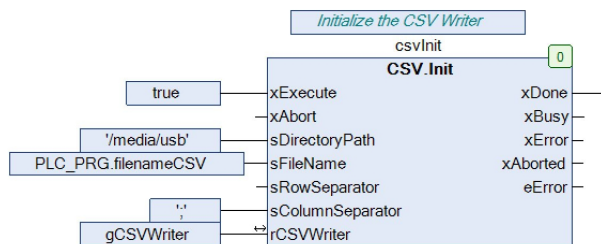
5.2.3 Ukládání naměřených dat

Pro ukládání dat byl zvolen formát souboru CSV. Toto umožňuje balíček CSVUtility dostupný z internetového obchodu Codesys store. Po odzkoušení neplacené verze byla zakoupena licence. Balíček CSVUtility obsahuje funkce pro vytvoření nového souboru, inicializaci zapisování do konečného zařízení, přidávání jednotlivých hodnot jakéhokoli typu a zapisování do vytvořeného souboru. Tato část programu byla napsána pomocí CFC (Continuous Function Chart).

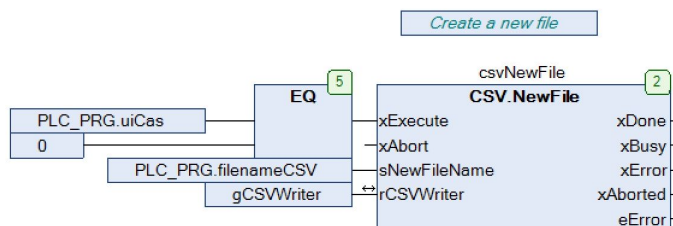
Blok CSV.Init je vždy vykonáván a vstupními parametry jsou cílová složka pro ukládání, název souboru a rozdělovač jednotlivých zapisovaných hodnot. Cílová složka leží v cestě 'media/usb', což je připojovací místo („mounting point“) externí USB paměti (popsáno v kapitole 5.1). Oddělovačem je středník. Název souboru je vytvářen v programu PLC_PRG a využívá informace o datu a čase a musí být vytvořen před tím, než se do něho začne zapisovat.

Tvorbu nového souboru má na starosti funkce CSV.NewFile, která na základě porovnávání času vytvoří nový soubor každou hodinu, tzn. pokud se minuta a sekunda rovnají 0, vytvoří se soubor. Tak jsou data srozumitelněji rozdělena pro pozdější použití. Název souboru tedy obsahuje datum a hodinu, kdy bylo zahájeno měření, konkrétně ve formátu „RRRR-MM-DD HH.csv“.

Do souboru je tedy postupně zapisováno datum a čas, rychlost vibrací z kanálu 1, z kanálu 2, z kanálu 3 a teplota. Všechny bloky mají výstupní hodnoty xDone, xBusy, xError, xAborted

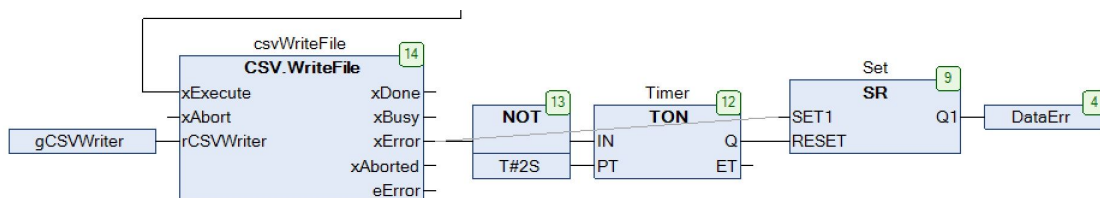


Obrázek 30: Ukázka kódu: Inicializace CSV



Obrázek 31: Ukázka kódu: Vytvoření nového CSV souboru každou hodinu

a eError. Pokud je vše v pořádku, xError je v 0. Pokud dojde k odpojení externí paměti nebo data nejsou zapisována z jiného důvodu, má CSV.WriteFile na výstupu xError logickou 1. Pomocí časovače typu on-delay je vytvořena logika pro proměnnou DataErr. Pokud je xError bloku WriteFile v logické 1 déle než 2s, nastaví se proměnná DataErr na logickou 1. V té zůstane, dokud nedojde k odstranění chyby. Funkce této proměnné je použita ve vizualizaci pro indikaci chyby a také pro indikační zelenou LED diodu na pouzdře výsledného zařízení.



Obrázek 32: Ukázka kódu: Logika pro indikaci chyby

5.2.4 Vytvoření OPC UA serveru

V rámci aplikace je k dispozici objekt „Symbol configuration“, jehož editor obsahuje možnosti pro práci se zadanými proměnnými. V nastavení je mj. k dispozici povolení podpory funkcí OPC UA. V tabulce jsou poté všechny proměnné figurující v daném projektu. Je možné u nich nastavit přístupová práva, zobrazuje se zde typ proměnné, popřípadě komentář. Co se týče přístupových práv, nastavení má čtyři možnosti, a to pouze čtení, pouze zápis, čtení i zápis nebo příkaz vykonat (execute).

| Symbols | Access Rights | Maximal | Attribute | Type |
|-------------|---------------|---------|-----------|-------------|
| PLC_PRG | | | | |
| AD | | | | LREAL |
| AD2 | | | | LREAL |
| AD3 | | | | LREAL |
| AD4 | | | | LREAL |
| DataOK | | | | BOOL |
| T | | | | REAL |
| WriteValues | | | | |
| DataErr | | | | BOOL |
| Set | | | | Standard.SR |

Obrázek 33: Ukázka objektu konfigurace symbolů

Po nastavení přístupových práv je možné hodnoty vybraných proměnných číst, popř. je měnit. Pomocí vhodného OPC/UA klienta dojde k připojení na Raspberry PI OPC server a je možné monitorovat nebo zadávat hodnoty zpřístupněných proměnných. Na obrázku 33 jsou zobrazeny všechny zpřístupněné proměnné v rámci řešeného projektu. Přístupy jsou nastavené na možnost čtení i zápisu. Adresa OPC serveru je `opc.tcp://<Networkaddress>:4840`.

5.3 Vizualizace

Pro smysluplné monitorování provozních veličin byla potřeba vytvořit příslušná vizualizace těchto dat. Úkolem bylo vytvoření zobrazení takovými způsoby, které budou možné použít na jakýchkoli stanovištích provozu.

Na provozech, kde je řízení ovládáno převážně pomocí PLC a procesní vizualizace je řešena ve SCADA systémech, může být požadováno, aby výsledky řešeného monitorování bylo možné zobrazit ve stávající vizualizaci. Pro stanoviště, kde PLC řízení nefiguruje, byla vytvořena webová aplikace, která slouží jako vizualizace monitorovaných hodnot. V případě provozů, které nemají přístup ke komunikační síti, nelze tedy tyto hodnoty sledovat online, je využito ukládání do externí paměti a následné zobrazení v prohlížeči csv souborů.

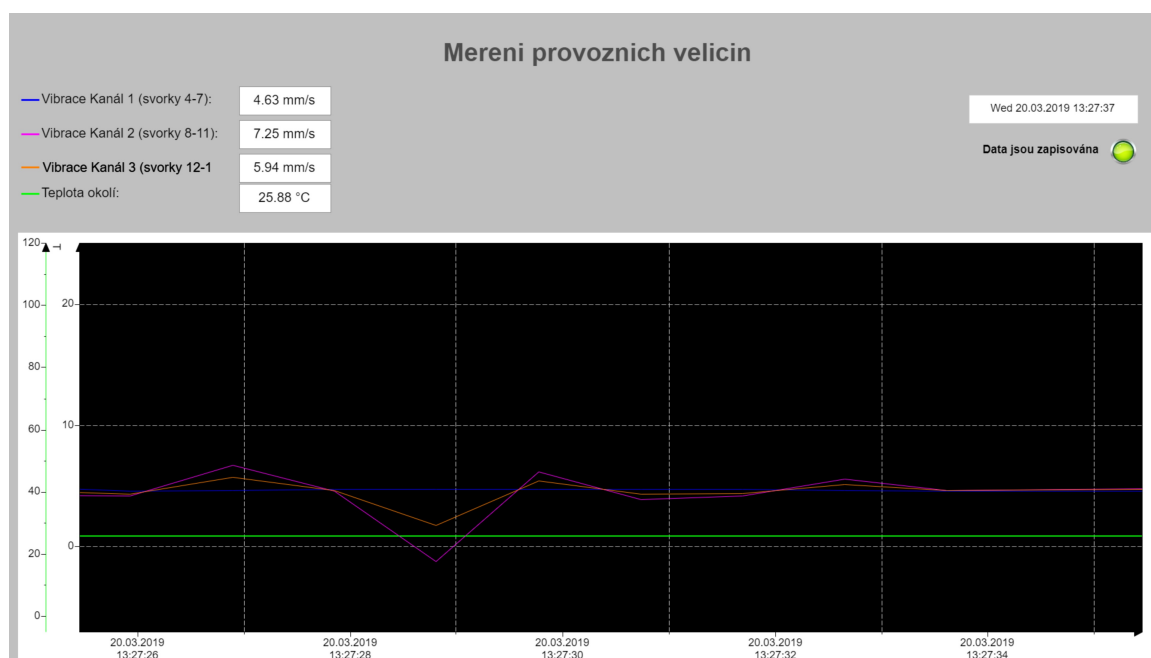
5.3.1 Webová aplikace

Vizualizace dostupná v rámci podnikové technologické sítě je zajištěna webovou aplikací vytvořenou rovněž v prostředí Codesys. Součástí aplikace je objekt „VisualizationManager“, který umožňuje tvorbu vizualizace aplikace na Raspberry PI a webové vizualizace. Vizualizace na Raspberry PI není potřebná, protože k zařízení není uzpůsobeno pro připojení obrazovky. Bylo využito možnosti tvorby webové vizualizace, která byla pojmenována I2C_Visu a její adresa je `url<Network Address>:8080/webvisu.htm`. Název .htm souboru je nastavitelný při tvorbě vizualizace a byl vybrán název webvisu.htm. Další nastavení je rychlost aktualizování stránky, změny měřítka apod.

Ve webové vizualizaci je umístěn graf, tabulka a LED indikace. V grafu jsou zobrazovány aktuální hodnoty rychlosti vibrací a teploty za posledních 10 s. Rychlost vibrací má svou osu y v rozsahu od -5 do 55 (měřený rozsah je (0 – 50) mm/s) a osa y náležící hodnotě teploty je v rozsahu od -5 °C do 120 °C . V tabulce jsou informace o jednotlivých proměnných, barva průběhu, hw svorky náležící jednotlivým kanálům a aktuální hodnoty. (Obrázek 34)

Indikace napojená na proměnné DataErr, respektive DataOk způsobuje rozsvícení LED červeně, respektive zeleně, a spolu s textem vyjadřuje, zda jsou data zapisována do externí paměti nebo ne.

V této vizualizaci není možné zobrazit historická data.

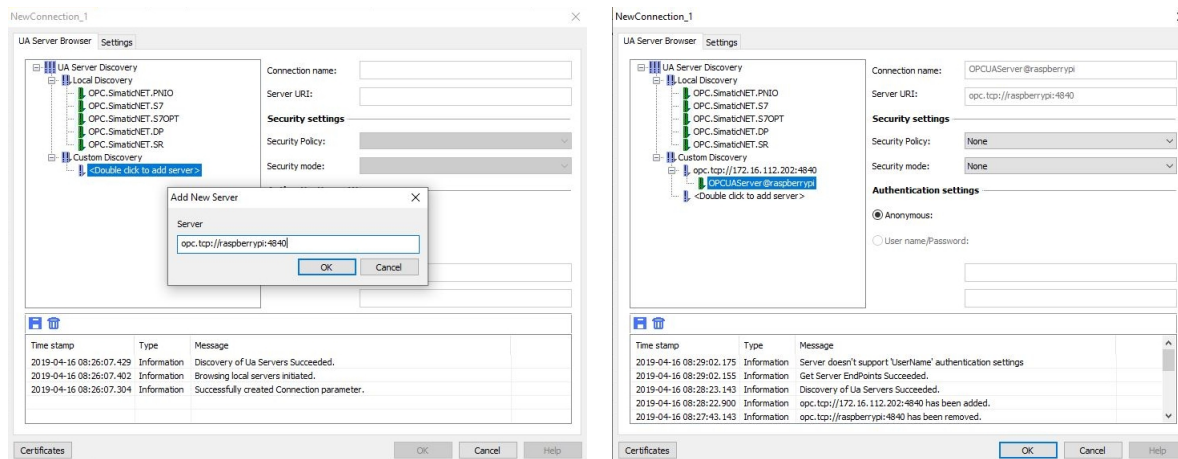


Obrázek 34: Ukázka webové vizualizace vytvořené v prostředí CODESYS

5.3.2 Vizualzace v systému SCADA

Z důvodu potřeby zobrazit naměřené hodnoty ve stávající vizualizaci byl vytvořen zmíněný OPC server (kapitola 5.2.4). Byl použit SCADA systém SIMATIC WinCC V7.4 SP1, který umožňuje komunikaci s OPC/UA servery. Pro správnou funkci bylo třeba doinstalovat aktualizace (WinCC_ V74_ Upd2), které opravují chyby funkce OPC vyskytující se v základní verzi. Ve stávajícím projektu vizualizace bylo třeba v rámci Tag Managementu přidat spojení s OPC serverem. Toho bylo dosaženo přidáním OPC UA driveru v rámci Tag Managementu a dále přidáním spojení. Obrázek 35 popisuje vyhledání žádaného serveru. Po úspěšném nalezení a připojení k serveru dojde k vyplnění jména a adresy spojení.

Jakmile dojde k úspěšnému spojení, je možné prohledat zadaný server a vybrat, které ze zpřístupněných proměnných jsou užitečné pro projekt vizualizace. Proměnné, které jsou vy-



(a) Zadávání adresy OPC serveru

(b) Nalezený a připojený server

Obrázek 35: Vytvoření nového spojení OPC serveru

čítány z OPC serveru jsou informace o rychlosti vibrací a teplota a dále DataErr a DataOk, která slouží k indikaci úspěšného zapisování dat do externí paměti. Informace vztahující se k měřeným hodnotám jsou zároveň archivována v rámci Tag Logging pro zobrazení historických průběhů.

Byla vytvořena samostatná obrazovka, která obsahuje graf a tabulku. Graf zobrazuje jednotlivé veličiny, tzn. rychlost vibrací ze 3 kanálů a teplotu. Rychlost vibrací má svou osu y, která se pohybuje od -5 do 55 (měřený rozsah je (0 – 50) mm/s a teplota má svou osu y, která je v rozsahu od 0 do 30. Osa x je škálovatelná pomocí tlačítek na okraji okna grafu, je možné nastavit dvanáct různých rozsahů (1 min, 5 min, 15 min, 30 min, 1 hod, 2 hod, 5 hod, 10 hod, 1 den, 7 dní, 15 dní, 1 měsíc). Právě díky možnosti archivace mohou být data zobrazena za několik měsíců.

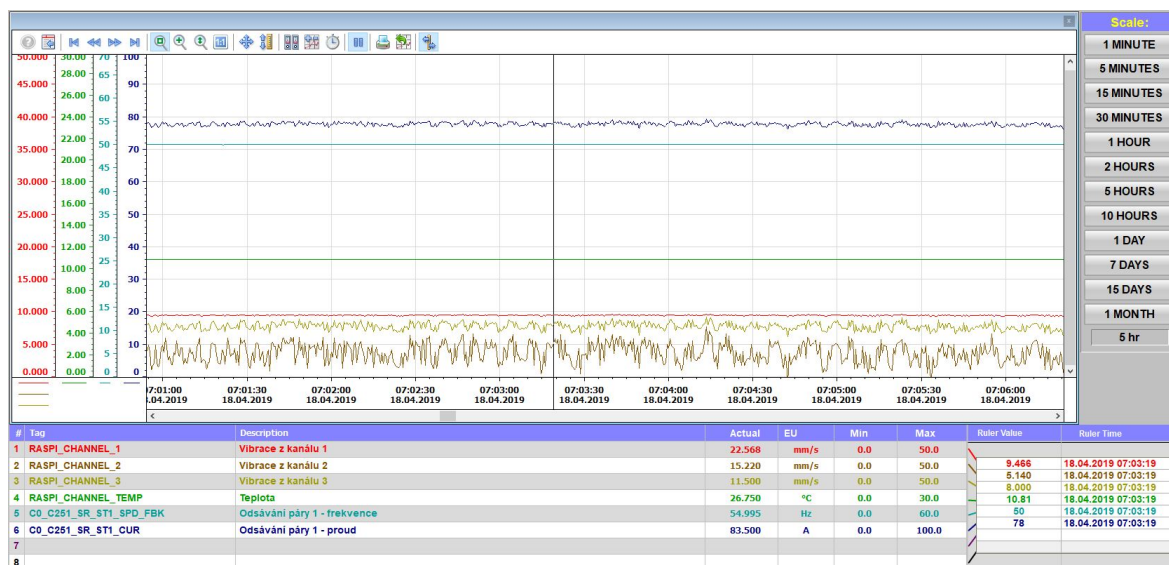
Kromě hodnot vibrací a teploty je možné do grafu přidat další měřené veličiny daného provozu. V rámci testování bylo zařízení instalováno na elektromotor ventilátoru odsávání par. Přidanými veličinami v tomto případě byla frekvence napětí z frekvenčního měniče, která je přímo úměrná otáčkám motoru a proud motoru.

Pod oknem s grafem je umístěny dvě tabulky. Velká tabulka s měřenými hodnotami, zobrazení tagu jednotlivých proměnných, jejich popis, aktuální hodnota a hodnoty minima a maxima, kterých můžou dosáhnout. Druhá tabulka zobrazuje hodnoty z archivu v závislosti na poloze pravitka.

Hardwarová indikace, stejně jako indikace ve webové aplikaci, vyjadřující chybu v zapisování dat do externí paměti je řešena pomocí LED diod. V rámci WinCC je tato funkce nahrazena vytvořením alarmu, který se objeví v případě nezapisování dat. Alarm je napojen na proměnnou DataErr, která je přejímána z OPC serveru.

Další proměnnou, která slouží pro funkci alarmu je ComErr. Tato proměnná je stále v 0. V případě chyby komunikace s OPC serverem je její hodnota substituována hodnotou 1. K tomu

bylo využito vestavěné funkce WinCC. Pokud má ComErr hodnotu 1, objeví se alarm indikující chybu komunikace.



Obrázek 36: Ukázka vizualizace vytvořené v prostředí SIMATIC WinCC, část okna



Obrázek 37: Ukázka vizualizace vytvořené v prostředí SIMATIC WinCC, český alarm

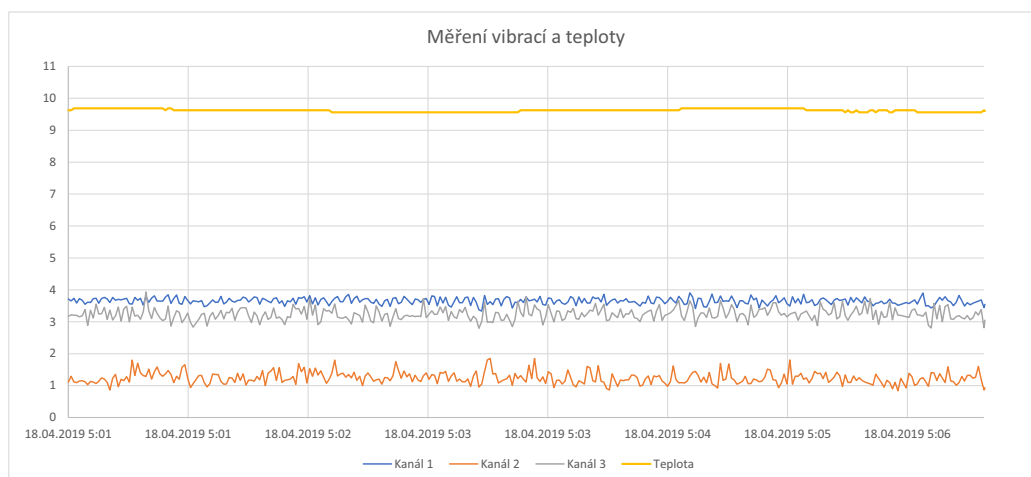


Obrázek 38: Ukázka vizualizace vytvořené v prostředí SIMATIC WinCC, anglický alarm

5.3.3 Zobrazení uložených dat z externí paměti

Všechna naměřená data jsou spolu s datem a časem ukládána do CSV souboru. Každou hodinu je automaticky vytvořen nový soubor s označením data a hodiny. Tyto soubory jsou ukládány do externí paměti, která je připojena do USB portu Raspberry PI. Složka, ve které jsou soubory uloženy je zpřístupněna v síti, takže je možné se na Raspberry PI připojit a data

si stáhnout. CSV soubor je koncipován tak, aby byl spustitelný v programu MS Office Excel tím, že používá jako výchozí oddělovač středník. Informace jsou poté zobrazeny v tabulce, kdy v první sloupci je výpis data a času sejmutí dat, druhý až čtvrtý sloupec obsahuje hodnoty rychlosti vibrací postupně ze všech tří kanálů a do pátého sloupce je zapisována teplota. Z těchto hodnot je poté možné sestavit bodový (XY) graf, pro grafické zobrazení naměřených hodnot.



Obrázek 39: Graf vytvořený z uložených hodnot v programu MS Office Excel

6 Testování

V rámci testování bylo provedena kontrola funkce vytvořené DPS, kde se testoval přenos analogového a digitálního signálu a funkce RTC. Testování analogového signálu bylo provedeno pomocí kalibrátoru od firmy Siemens. Druhou částí bylo testování již samotného vytvořeného zařízení. Byly testovány všechny jednotlivé komponenty a softwarové části. Funkce hardwarového tlačítka a LED diod, připojení do komunikační sítě pomocí ethernetu a Wi-Fi a hlavní program. Měření vibrací a teploty bylo provedeno v průmyslovém prostředí.

6.1 Funkce vytvořeného shieldu pro Raspberry PI

Pro testování funkčnosti vytvořeného shieldu bylo provedeno měření teploty, přenos signálu z proudových vstupů a otestování RTC. Teplotní čidlo DS18B20 bylo připojeno na vstupní svorky. DS18B20 využívá komunikační rozhraní OneWire. Výsledky měření byly zobrazeny na Raspberry PI, kde byl napsán příslušný program, který zaznamenává hodnotu teploty s periodou 0,5s. Měření teploty proběhlo správně, v době testování byla teplota okolí 25,75 °C, hodnoty byly porovnány s měřenou teplotou použitého kalibrátoru, který obsahuje měření teploty.

Pro ověření správnosti přenosu a převodu signálu z proudových vstupů byl použit CALIBRATOR 05 od firmy Siemens¹. Byl proměřen celý rozsah od 0 mA do 20 mA s krokem 0,5 mA. Kalibrátor byl připojen postupně na vstupní svorky DPS, která byla propojovacími kabely připojena na piny Raspberry PI. Na Raspberry PI byl vytvořen program pro zobrazení dat, která jsou posílána z A/D převodníku pomocí I²C komunikace. Naměřená data byla srovnána s vypočítanými ideálními hodnotami. Ideální hodnoty byly vypočítány podle následujícího vzorce:

$$U_{sh} = (R \cdot I) \cdot G, \quad (13)$$

kde

U_{sh} napětí měření na výstupu ze shieldu (V)

R odpor u operačního zesilovače (Ω)

I proud z kalibrátoru přiváděný na vstupní svorky shieldu (mA)

G zesílení operačního zesilovače

Ideálně je hodnota odporu 25 Ω a zesílení se rovná 8.

Příklady výpočtu pro hodnoty proudu 4 mA a 20 mA:

$$\begin{aligned} U_{sh} &= (R \cdot I) \cdot G \\ U_{sh} &= (25 \cdot 4 \cdot 10^{-3}) \cdot 8 \end{aligned} \quad (14)$$

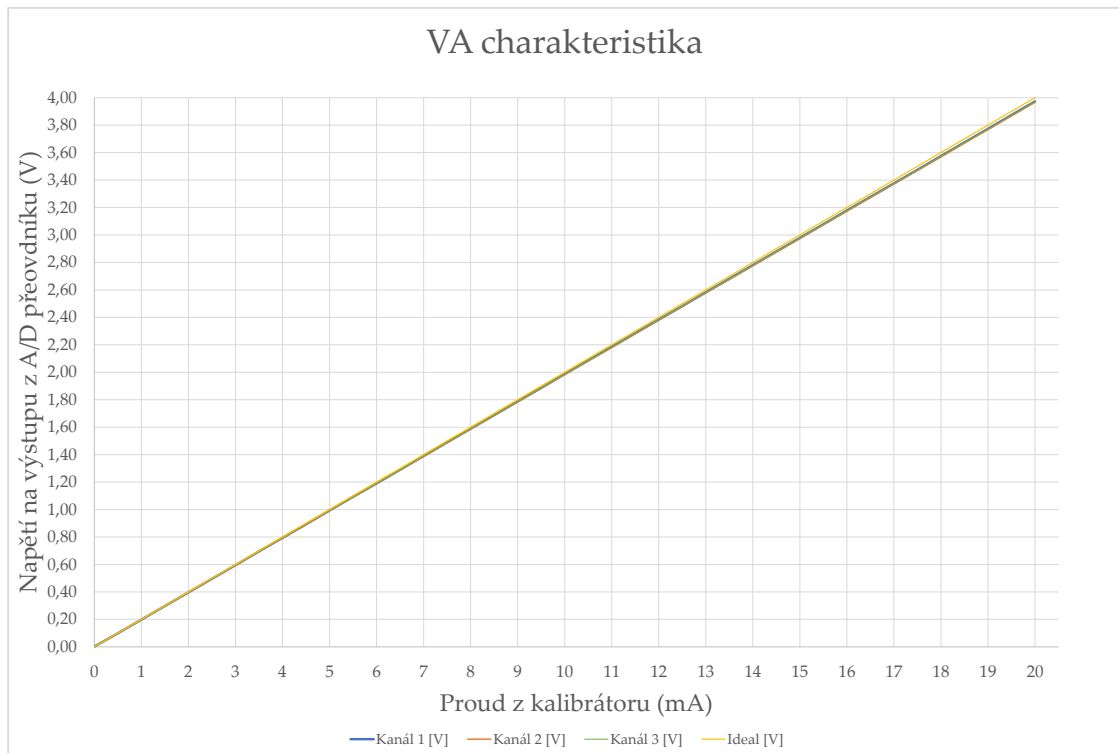
¹Kalibrační číslo: 99 81 62, datum kalibrace: 19. 5. 2018

$$U_{sh} = 0,8 V,$$

$$U_{sh} = (R \cdot I) \cdot G \quad (15)$$

$$U_{sh} = (25 \cdot 20 \cdot 10^{-3}) \cdot 8$$

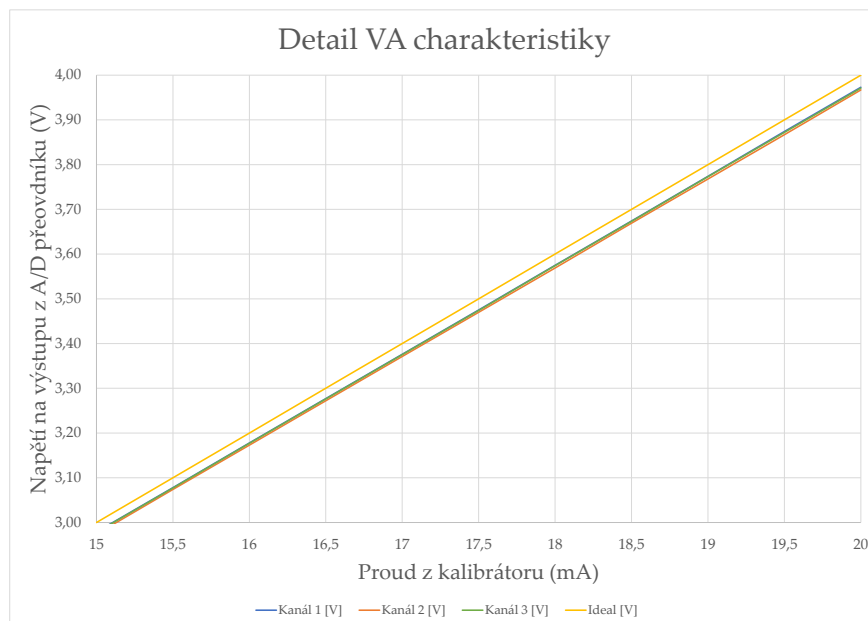
$$U_{sh} = 4 V,$$



Obrázek 40: Průběhy výsledků měření proudových vstupů a ideálních hodnot, $t_o = 25, 75^\circ\text{C}$

Z grafu je možné vyčíst, že VA charakteristika je lineární a hodnoty ze všech 3 kanálů jsou přibližně stejné. Liší se v tisícinách hodnoty, což je pro orientační měření plně dostačující. Další informací, která je získána z grafu, je odchylka naměřených a ideálních hodnot. Tato odchylka roste přímo úměrně se zvyšujícím se proudem respektive napětím. Toto odchýlení je způsobeno nepřesnou hodnotou zesílení, která by ideálně měla být 8, ale ve skutečnosti je cca 7,9. Výpočet popisuje vztah 12 a zdůvodnění této odchylky je popsáno v přílehlé podkapitole 4.1. Všechny naměřené hodnoty obsahuje tabulka 4 v příloze III.

Hodiny reálného času byly ověřeny odpojením Raspberry PI od internetového připojení. Po vypnutí a odpojení Raspberry PI ze sítě, správný čas a datum měl udržovat čip DS3231



Obrázek 41: Detail průběhů výsledků měření pro hodnoty proudu (15 – 20) mA, $t_o = 25, 75^\circ\text{C}$

od firmy Maxim Integrated. Při odpojení napájení je použito záložní napájení z baterie. RTC fungovaly korektně, po opětovném zapnutí Raspberry PI byly čas i datum správné.

6.2 Finální zařízení v průmyslovém prostředí

Pro testování celkové funkce zařízení byl vybrán provoz s přístupem ke komunikační síti prostřednictvím Wi-Fi připojení a vizualizací WinCC, aby bylo možné otestovat všechny vytvořené možnosti vizualizace a ukládání dat. Na tomto provozu se nachází ventilátorové soustrojí, které slouží k odtahu par z lící komory. Skládá se z ventilátoru o průměru 1,5 m a elektromotoru, který je řízen frekvenčním měničem. Otáčky elektromotoru jsou přímo úměrné frekvenci napětí vycházejícího z frekvenčního měniče. V tomto případě se frekvence nastavuje v rozmezí (40 – 60) Hz v závislosti na technologických požadavcích. Přenos točivého momentu z elektromotoru na ventilátor je řešen pomocí klínových řemenů. Celé soustrojí je usazeno k zemi přes silentbloky, které tlumí případné vibrace. Fotky celého soustrojí je možné nalézt v příloze III.

Zařízení bylo instalováno na elektromotor ventilátoru odsávání par. Jedná se o elektromotor typu F250M04 firmy SIEMENS v patkovém provedení s následujícími technickými parametry:

- výkon: 55 kW
- otáčky: 1480 ot./min
- napětí: 400/690V, 50 Hz

V průmyslovém prostředí bylo zařízení ponecháno 24 hodin, kdy celou dobu monitorovalo vibrace elektromotoru a teplotu okolí. Vibrační senzory byly našroubovány na podstavu, ve třech osách. Osa x byla v ose hřídele elektromotoru, osa y byla kolmá k podlaze a osa z, která s ostatními osami svírala úhel 90° . Podstava byla magnetem připevněna na monitorovanou konstrukci elektromotoru. Z důvodu uchycení elektromotoru k celému soustrojí nebylo možné měřit vibrace pouze elektromotoru, ale dochází k měření vibrací celého systému. (Obrázek 42)



Obrázek 42: Upevnění vibračních snímačů na elektromotoru

Jelikož je upevnění magnetem vhodné do 7 kHz a běžně se využívá pro provozní měření do 2 kHz, bylo toto provedení dostatečné. Důležitým údajem jsou hodnoty z kanálu 1, které vyjadřují rychlost vibrací v ose y. V této ose dochází k případnému vibrování elektromotoru, ale zároveň jsou do této hodnoty začleněny vibrace celé konstrukce. Teplotní čidlo bylo použito pro snímání teploty elektromotoru a v pozdějším měření teploty okolí. (Obrázek 43)

Kontinuální měření probíhalo 24 hodin. Každou hodinu měření byl vytvořen jeden CSV soubor, do kterého byla zapisována monitorovaná data. Po celou dobu bylo možné sledovat měřená data v provozní vizualizaci. Příklad souboru naměřených dat je v příloze III. Uložené CSV soubory mají v průměru velikost 300kB, což např. při týdenním kontinuálním měření znamená celkově využitou paměť o velikosti cca 50MB.

Jelikož bylo monitorování prováděno za běžného provozu daného stanoviště, je možné na naměřených datech sledovat různé stavy v průběhu měření. Na obrázcích 44 a 45 je možné vyčíst změnu hodnot vibrací při různé frekvenci. Udávaná hodnota je frekvence napětí vycházející z frekvenčního měniče, který řídí otáčky daného motoru. Tato frekvence a proud motoru je součástí grafického zobrazení a jejich aktuální hodnoty jsou zobrazeny v tabulce pod grafem. Na obrázku 44 je hodnota frekvence 50 Hz a na obrázku 45 je hodnota frekvence 55 Hz. Rychlost vibrací v ose y je po této změně frekvence téměř dvojnásobná.

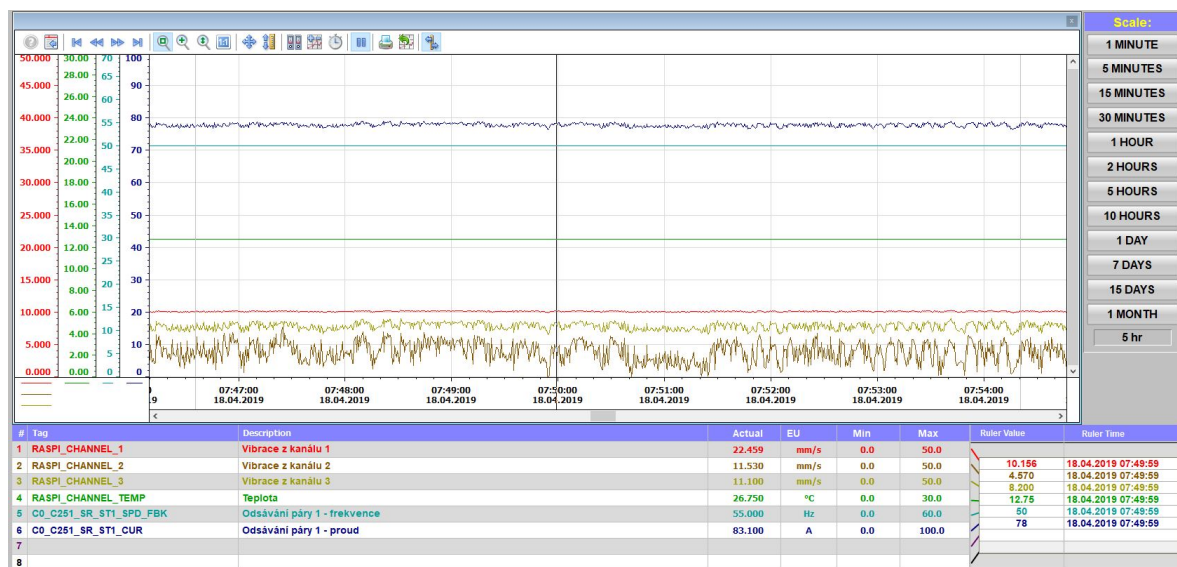


Obrázek 43: Upevnění teplotního snímače na elektromotoru

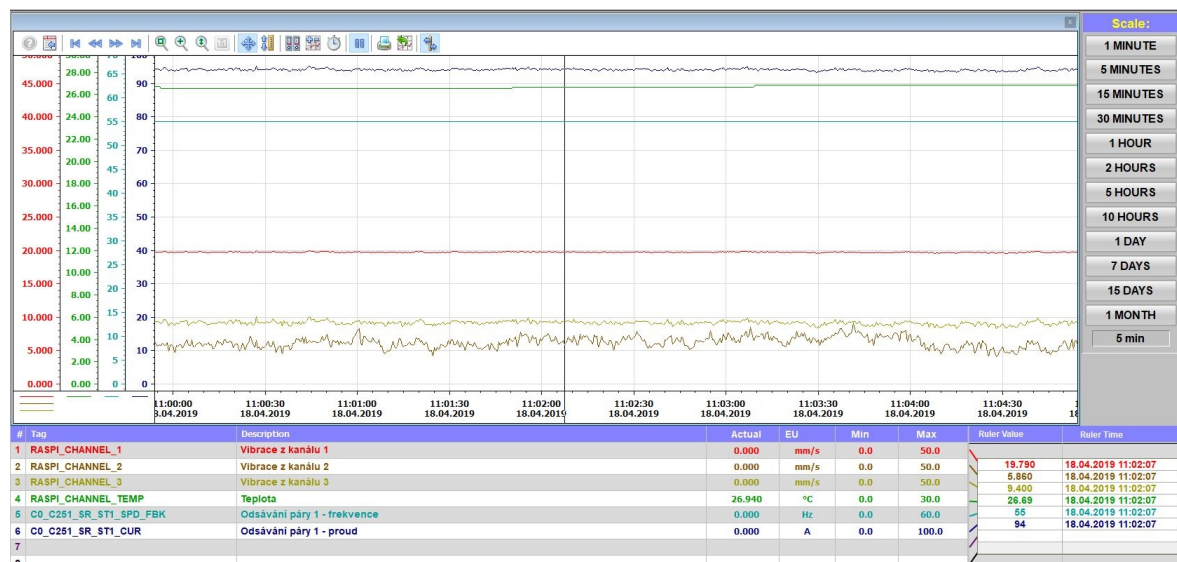
Bylo provedeno kontrolní měření technikem pro otestování správnosti hodnot. Použitý přístroj byl SKF – Microlog Analyzer AX se snímačem SKF – CMSS 2200. Měřené hodnoty z vibračních senzorů byly shodné s hodnotami kontrolního měření přístrojem SKF.

Z naměřených hodnot vyplývá že se vibrace pohybují v pásmu C, což znamená, že stroj je neuspokojivý pro trvalý provoz, ale může být provozován do doby, než se opraví. Tato informace je součástí záznamu o měření, který byl předán údržbě zařízení.

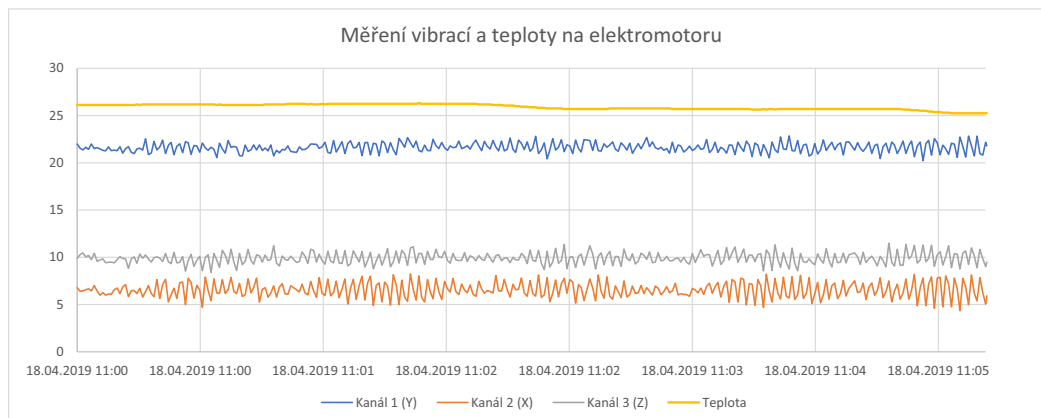
V rámci testování bylo zjištěno, že ne vždy dochází k automatickému připojení externí paměti. To bylo způsobeno chybným postupem spouštění skriptů pro ovládání připojení USB a funkce vypínacího tlačítka. Bylo potřeba nastavit pořadí spouštění skriptů tak, aby se připojení paměti provedlo jako první. Dále již byla funkce všech obslužných programů správná.



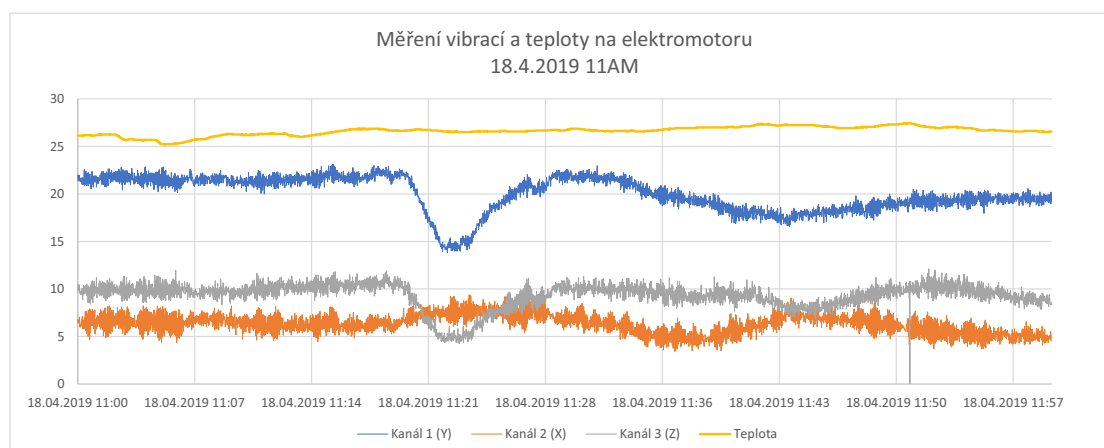
Obrázek 44: Naměřené hodnoty provozních veličin při frekvenci 50 Hz, vizualizace: WinCC



Obrázek 45: Naměřené hodnoty provozních veličin při frekvenci 55 Hz, vizualizace: WinCC



Obrázek 46: Naměřené hodnoty provozních veličin při frekvenci 55 Hz, vizualizace: Excel



Obrázek 47: Naměřené hodnoty provozních veličin 18.4.2019 (11 – 12) AM

Závěr

Cílem diplomové práce bylo vytvoření samostatně pracujícího přenosného zařízení, které bude použito pro měření provozních veličin. Práce byla tvořena ve spolupráci s místním průmyslovým podnikem. Kromě samostatnosti bylo dalšími požadavky vytvoření různých vizualizací pro více typů provozů, ukládání naměřených dat, připojení ke komunikační síti, možnost měření různých provozních veličin. Primárně byla práce zaměřena na měření teploty a vibrací.

Součástí práce je zhotovená rešerše z hlediska přenosu měřených hodnot v průmyslovém prostředí a měření teploty a vibrací. Tato témata byla zpracována v kapitolách 1 a 2. Pro pochopení problematiky měření těchto provozních veličin byly nastudovány příslušné normy a další literatura. V teoretické části jsou popsány jak dané veličiny, tak způsoby jejich měření a použití různých senzorů.

V rámci práce byla zpracována analýza požadavků a návrh měřicího řetězce. Samostatnost a přenositelnost zařízení byla zajištěna výběrem platformy Raspberry PI jako jádra celého zařízení. Pro tuto práci bylo zvoleno teplotní čidlo DS18B20 a senzor vibrací VKV022. Teplotní čidlo má digitální výstup a senzor vibrací výstup analogový. Z důvodu absence analogových vstupů a hodin reálného času na Raspberry PI bylo potřeba navrhnout dodatečný hardware pro doplnění jeho funkce. Dalšími částmi měřicího řetězce jsou možnosti vizualizace naměřených dat, jejich ukládání a zpřístupnění pro SCADA systémy.

Dalším krokem byla realizace hardwarové části práce. Celé zařízení představuje sestavu několika dílčích částí, které jsou uloženy v plastovém šasi s krytím IP55. Zařízení obsahuje Raspberry PI, shield pro Raspberry PI, obslužné a indikační prvky, napájecí zdroje a svorkovnici. Vytvořený shield byl připojen k Raspberry PI, resp. jeho pinům pro výstup 5 V, signálové zemi, digitální vstup pro OneWire sběrnici a pinům pro I²C komunikaci. Slouží pro připojení teplotního čidla a senzorů s proudovým výstupem. Další funkcí je převod analogového signálu na digitální pomocí AD převodníku a generování hodin reálného času. Jednotlivé komponenty jsou napájeny 5 V z výstupu Raspberry PI. Napájecí zdroj slouží k napájení analogových snímačů a pomocí modulu step-down je použit pro napájení Raspberry PI. Přístupnými prvky jsou vypínací tlačítko s indikačními LED diodami a RJ-45 konektor pro připojení Ethernetu.

Po úspěšné realizaci hardwaru byl implementován software, který zahrnuje několik samostatných členů. Pro funkci vypínacího tlačítka a indikačních LED diod byly vytvořeny skripty v jazyce Python, které jsou spuštěny po zapnutí Raspberry PI. Ukládání měřených dat je řešeno pomocí externí USB paměti. Připojení je řešeno v samostatném programu, který umožňuje automatické připojení USB, a proto nevyžaduje uživatelský zásah. Hlavní program je napsán v prostředí CODESYS s rozšířením Control for Raspberry PI. Pro příjem a zpracování dat z AD převodníku byla vytvořena samostatná knihovna jejíž výstupem je napěťová hodnota odpovídající získávanému signálu. Tím je zajištěna modularita připojené instrumentace. Následně byl vytvořen program zaměřený na měření a záznam vibračních a teplotních veličin. V rámci programu je příjem dat z teplotního senzoru, převod napěťových dat z knihovny AD převodníku

na hodnotu rychlosti vibrací a ukládání naměřených dat. Další funkcí programu je vizualizace a příprava dat pro externí SCADA systémy. Pomocí prostředí CODESYS byla vytvořena webová vizualizace a OPC UA server.

Z důvodu rozmanitosti provozů bylo vytvořeno více typů vizualizace. Kromě webové byla vytvořena vizualizace v systému WinCC, která využívá komunikaci s OPC UA serverem, ze kterého vyčítá měřená a stavová data. V rámci této vizualizace je také možné zobrazení historických dat za několik měsíců.

Posledním krokem bylo testování v průmyslovém prostředí. Testování proběhlo na provozu s přístupem ke komunikační síti pomocí Wi-Fi připojení a vizualizací WinCC. Zařízení bylo použito pro měření vibrací a teploty elektromotoru, který je součástí ventilátorového soustrojí pro odtah par z licí komory. Bylo provedeno kontinuální měření, trvající 24 hodin, pro otestování všech dílčích částí. V rámci testů bylo provedeno také kontrolní měření technikem pro diagnostiku pro potvrzení správnosti hodnot.

Vytvořené zařízení je samostatné, modulární a cenově dostupné. Ve srovnání s řešením pomocí PLC, kdy je potřeba přítomnost měřicích karet a kabeláže, je cena výsledného produktu zlomková. Aktuální program je zaměřen pouze na měření vibrací a teploty, ale zařízení nabízí širokou škálu použití a rozšíření.

Je připraveno pro připojení jakýchkoli senzorů s výstupní proudovou smyčkou (4 – 20) mA, např. snímače průtoku, CO₂, kyslíku, proudu apod. Přepočtu měřeného rozsahu a změny jednotek měřených veličin lze dosáhnout jednoduchou softwarovou úpravou. Rozšířením může být vytvoření samostatné aplikace s výběrem např. příslušného provozu, monitorovaného zařízení a měřených veličin.

Literatura

- [1] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika : senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-158-6.
- [2] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 8073001454.
- [3] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů : studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1.
- [4] RIPKA, Pavel *Senzory a převodníky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03123-3.
- [5] ČSN ISO 13373-1. *Monitorování stavu a diagnostika strojů - Monitorování stavu vibrací - Část 1: Obecné postupy*. 1. vyd. Praha: Český normalizační institut, 5.2003
- [6] ČSN ISO 13373-2. *Monitorování stavu a diagnostika strojů - Monitorování stavu vibrací - Část 2: Zpracování, prezentace a analýza vibračních dat*. 2. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1.2017
- [7] ČSN ISO 13373-3. *Monitorování stavu a diagnostika strojů - Monitorování stavu vibrací - Část 3: Návod pro vibrační diagnostiku*. 1. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1.2017
- [8] ČSN ISO 13373-9. *Monitorování stavu a diagnostika strojů - Monitorování stavu vibrací - Část 9: Diagnostické metody pro elektromotory*. 1. vyd. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 8.2018
- [9] ČSN ISO 20816-1. *ČSN ISO 20816-1. Vibrace - Měření a hodnocení vibrací strojů - Část 1: Obecné pokyny*. 1. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 9.2017
- [10] ČSN 25 8010. *Směrnice pro měření teplot v průmyslu* 1. vyd. Praha: Český normalizační institut, 9.1989
- [11] ČSN EN 60751. *Průmyslové platinové odporové a platinové teplotní senzory* 1. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 10.2014
- [12] ČSN EN 60584-1 ed. 2 *Termoelektrické články - Část 1: Údaje napětí a tolerance* 1. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 06.2014

- [13] ZUTH, D. – Vdoleček, F. *Měření vibrací ve vibrodiagnostice*, Automa č. 01/2010, s. 32–36, ISSN 1210-9592.
- [14] HARRIS, F.J. *On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform*. Proceedings of the IEEE [online]. 1978, 66(1), 51-83 [cit. 16. 1. 2019]. DOI: 10.1109/PROC.1978.10837. ISSN 0018-9219. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1455106/>
- [15] KOUTNÝ, Jaroslav a Ivo VLK. *Elektronika I učebnice*. VYTVOŘENO V RÁMCI PROJEKTU: DIGITÁLNÍ ŠKOLA: ICT VE VÝUCE TECHNICKÝCH PŘEDMĚTŮ, REG. Č. CZ.1.07/1.1.04/01.0137, Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola elektrotechnická, Olomouc 2009
- [16] DUBEC Miroslav, Jaromír SKOTNICA *Senzory a měření*. Studijní materiály pro studijní obor měřicí a řídicí technika fakulty elektrotechniky a informatiky, REG. Č. CZ.1.07/2.2.00/15.0113, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2012
- [17] KADLEC, Karel a Miloš KMÍNEK. *Měřicí a řídicí technika*, elektronický učební text, VŠCHT Praha 2001
- [18] *Technická diagnostika, Měření a diagnostika vibrací*, Učební text, Ivan Jaksch, 2010
- [19] VOJÁČEK, Antonín. *Měření vibrací pro diagnostiku opotřebení strojů*. Automatizace.hw.cz [online]. 2015 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/mereni-vibraci-pro-diagnostiku-opotrebeni-stroju.html>
- [20] *Vibrace*. BOZP info [online]. 2004 [cit. 27. 3. 2018]. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/vibrace>
- [21] Vít Špringl *Měření teploty - kovové odporové senzory teploty* vyvoj.hw.cz [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-kovove-odporove-senzory-teploty.html>
- [22] Vít Špringl *Měření teploty - polovodičové odporové senzory teploty* vyvoj.hw.cz [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>
- [23] Fluke Europe, B. V. *Nové přístupy ke správě obvodů proudové smyčky 4 až 20 mA*. ELEKTRO [online]. 2008, (11), 30 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38032.pdf>
- [24] VOJÁČEK, Antonín. *Proudová smyčka 4-20 mA - obecný popis*. Automatizace-hw [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/proudova-smycka-4-20-ma-obecny-popis>

- [25] VOJÁČEK, Antonín. *Teorie zpracování signálu platinových teplotních senzorů* Automatizace-hw [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/zpracovani-signalu-platinovych-senzoru>
- [26] Burr-Brown Corporation [online katalogový list]. *INA122*. ©2000 [cit. 9. 1. 2019]. Dostupné z <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina122.pdf>
- [27] Texas Instruments [online katalogový list]. *ADS111x*. ©2018 [cit. 10. 4. 2019]. Dostupné z <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>

Seznam příloh

Příloha I Obsah přiloženého CD

Příloha II Návrh DPS

Příloha III Testování

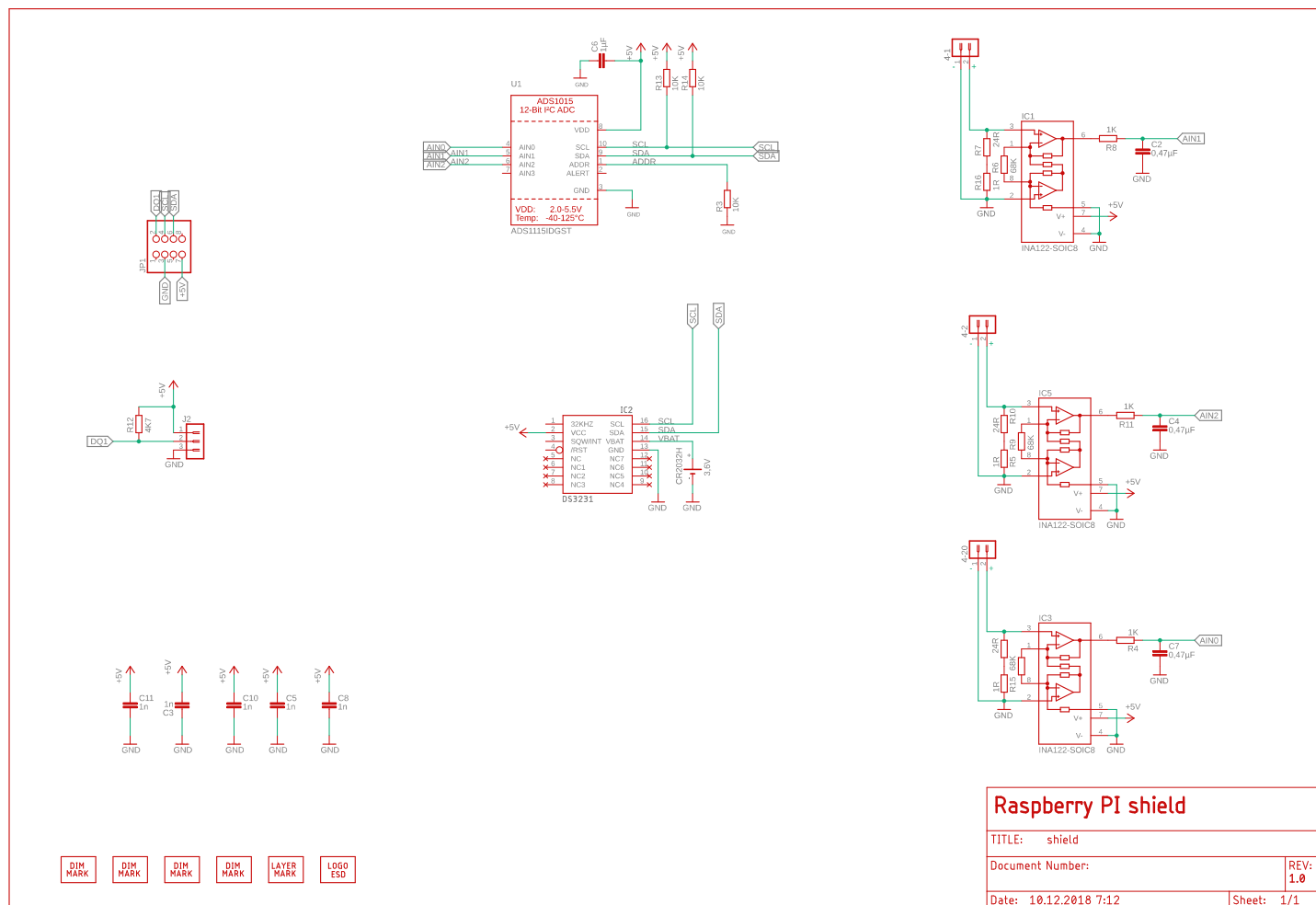
Příloha IV Analýza signálu ve frekvneční oblasti

Příloha I Obsah přiloženého CD

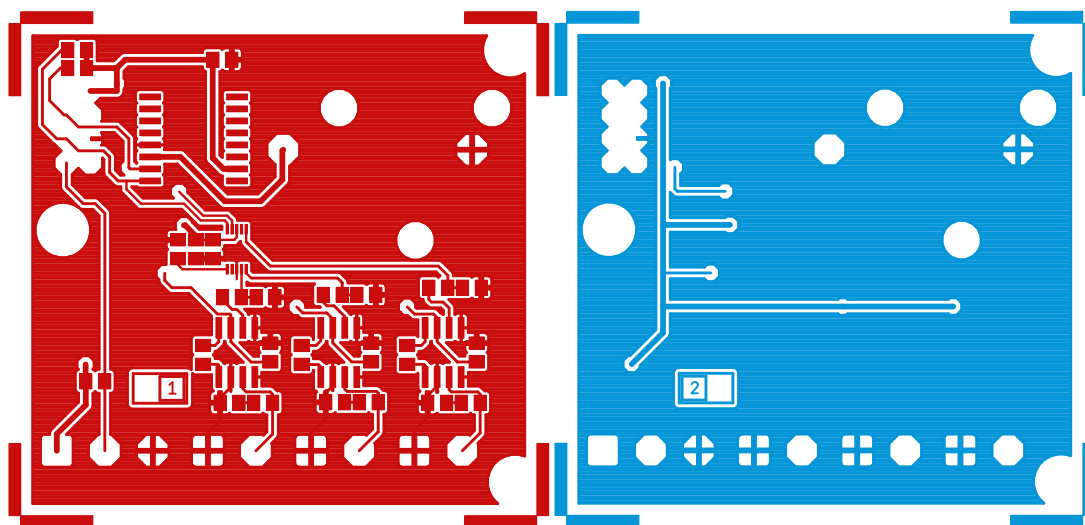
- CODESYS kód
- powerbutton.py
- mount.py

Příloha II Návrh shieldu a finálního zařízení

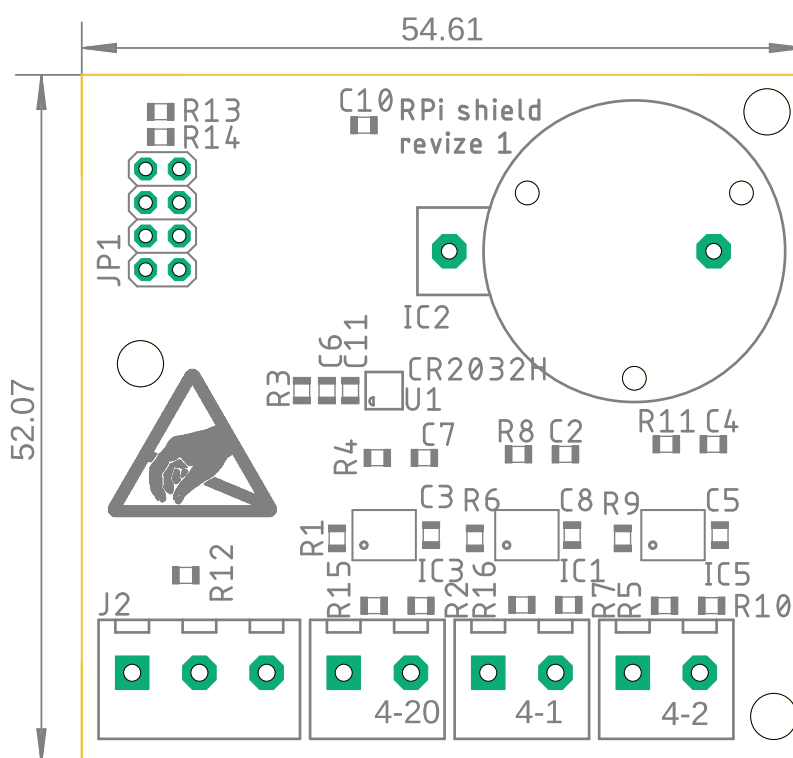
II



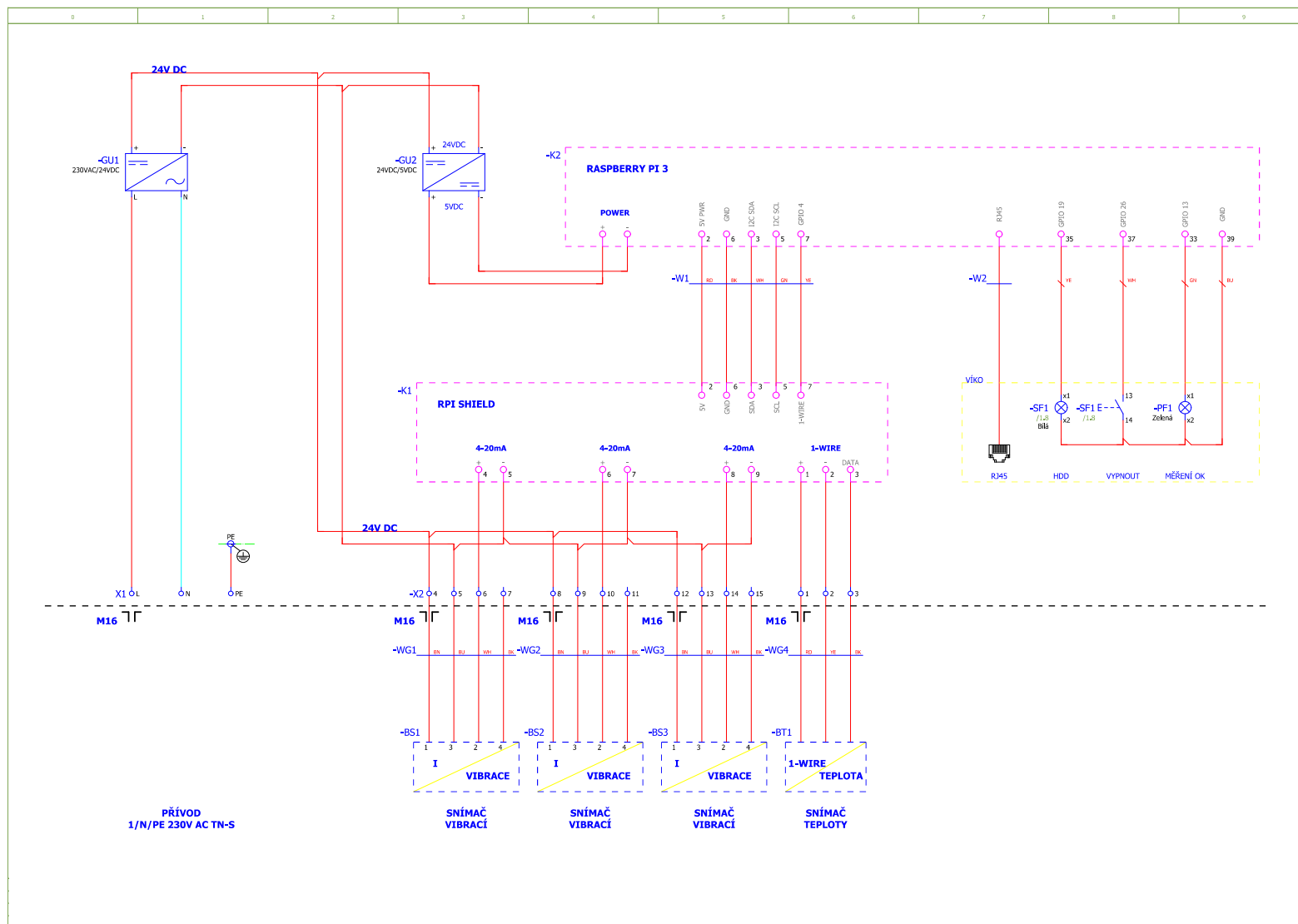
Obrázek 48: Celkové schéma navrženého shieldu



Obrázek 49: Zobrazení cest na DPS, vrstva TOP a BOTTOM



Obrázek 50: Zobrazení vrstvy potisku rozmístění komponent na DPS



Obrázek 51: Celkové schéma zařízení

Příloha III Testování

Tabulka 4: Výsledky měření proudových vstupů a ideální hodnoty

| Kalibrator (mA) | Kanál 1 (V) | Kanál 2 (V) | Kanál 3 (V) | Ideal (V) |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| 0 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,000 |
| 0,5 | 0,099 | 0,099 | 0,099 | 0,100 |
| 1 | 0,198 | 0,198 | 0,198 | 0,200 |
| 1,5 | 0,297 | 0,297 | 0,297 | 0,300 |
| 2 | 0,397 | 0,396 | 0,397 | 0,400 |
| 2,5 | 0,496 | 0,495 | 0,496 | 0,500 |
| 3 | 0,595 | 0,594 | 0,595 | 0,600 |
| 3,5 | 0,695 | 0,694 | 0,695 | 0,700 |
| 4 | 0,794 | 0,793 | 0,794 | 0,800 |
| 4,5 | 0,893 | 0,892 | 0,894 | 0,900 |
| 5 | 0,993 | 0,992 | 0,993 | 1,000 |
| 5,5 | 1,092 | 1,090 | 1,091 | 1,100 |
| 6 | 1,191 | 1,190 | 1,191 | 1,200 |
| 6,5 | 1,290 | 1,289 | 1,290 | 1,300 |
| 7 | 1,390 | 1,388 | 1,390 | 1,400 |
| 7,5 | 1,489 | 1,487 | 1,489 | 1,500 |
| 8 | 1,589 | 1,586 | 1,588 | 1,600 |
| 8,5 | 1,688 | 1,686 | 1,687 | 1,700 |
| 9 | 1,787 | 1,785 | 1,787 | 1,800 |
| 9,5 | 1,886 | 1,884 | 1,886 | 1,900 |
| 10 | 1,986 | 1,983 | 1,985 | 2,000 |
| 10,5 | 2,086 | 2,082 | 2,085 | 2,100 |
| 11 | 2,185 | 2,181 | 2,184 | 2,200 |
| 11,5 | 2,284 | 2,280 | 2,283 | 2,300 |
| 12 | 2,383 | 2,380 | 2,382 | 2,400 |
| 12,5 | 2,482 | 2,479 | 2,481 | 2,500 |
| 13 | 2,582 | 2,578 | 2,581 | 2,600 |
| 13,5 | 2,681 | 2,677 | 2,680 | 2,700 |
| 14 | 2,780 | 2,776 | 2,779 | 2,800 |
| 14,5 | 2,880 | 2,875 | 2,879 | 2,900 |
| 15 | 2,979 | 2,974 | 2,978 | 3,000 |
| 15,5 | 3,078 | 3,074 | 3,077 | 3,100 |
| 16 | 3,178 | 3,173 | 3,177 | 3,200 |
| 16,5 | 3,277 | 3,272 | 3,276 | 3,300 |
| 17 | 3,376 | 3,371 | 3,375 | 3,400 |
| 17,5 | 3,475 | 3,470 | 3,474 | 3,500 |
| 18 | 3,575 | 3,569 | 3,574 | 3,600 |
| 18,5 | 3,674 | 3,669 | 3,673 | 3,700 |
| 19 | 3,774 | 3,768 | 3,773 | 3,800 |
| 19,5 | 3,874 | 3,867 | 3,872 | 3,900 |
| 20 | 3,973 | 3,967 | 3,971 | 4,000 |

Tabulka 5: Ukázka uloženého souboru naměřených hodnot

| | Kanál 1 (Y) (mm/s) | Kanál 2 (X) (mm/s) | Kanál 3 (Z) (mm/s) | Teplota (°C) |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|
| 18.04.2019 11:00:01 | 21,988 | 6,789 | 9,875 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:02 | 21,555 | 6,408 | 10,277 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:03 | 21,369 | 6,443 | 10,472 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:04 | 21,640 | 6,570 | 10,043 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:05 | 21,427 | 6,677 | 10,196 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:06 | 21,999 | 6,453 | 9,755 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:07 | 21,505 | 7,013 | 10,433 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:08 | 21,603 | 6,429 | 9,570 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:09 | 21,462 | 5,987 | 9,725 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:10 | 21,323 | 6,265 | 9,829 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:11 | 21,271 | 5,997 | 9,433 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:12 | 21,680 | 6,118 | 9,481 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:13 | 21,275 | 6,099 | 9,491 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:14 | 21,342 | 6,563 | 9,417 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:15 | 21,286 | 6,754 | 9,763 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:16 | 21,706 | 6,161 | 10,061 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:17 | 21,020 | 6,852 | 9,871 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:18 | 21,491 | 7,111 | 9,823 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:19 | 21,702 | 5,844 | 8,850 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:20 | 21,097 | 6,491 | 9,835 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:21 | 20,987 | 6,495 | 10,045 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:22 | 21,458 | 6,155 | 9,379 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:23 | 21,538 | 6,721 | 10,350 | 26,125 |
| 18.04.2019 11:00:24 | 21,350 | 5,796 | 9,902 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:25 | 22,550 | 6,375 | 10,244 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:26 | 20,883 | 7,020 | 9,823 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:27 | 21,035 | 6,167 | 9,493 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:28 | 22,260 | 5,834 | 9,970 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:29 | 21,354 | 7,644 | 10,045 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:30 | 21,667 | 5,643 | 9,927 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:31 | 22,405 | 7,109 | 9,549 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:32 | 20,979 | 7,660 | 10,401 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:33 | 21,843 | 5,292 | 9,531 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:34 | 22,163 | 6,008 | 9,323 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:35 | 20,862 | 6,719 | 10,505 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:36 | 21,740 | 5,643 | 9,421 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:37 | 22,005 | 7,308 | 9,481 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:38 | 21,087 | 7,389 | 10,076 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:39 | 22,246 | 5,004 | 8,546 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:40 | 22,105 | 7,781 | 9,674 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:41 | 20,900 | 7,360 | 10,302 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:42 | 21,837 | 5,672 | 9,054 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:43 | 21,789 | 7,038 | 9,703 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:44 | 21,111 | 6,551 | 10,105 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:45 | 22,100 | 4,689 | 8,587 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:46 | 21,586 | 7,907 | 9,989 | 26,187 |
| 18.04.2019 11:00:47 | 21,331 | 6,491 | 10,265 | 26,187 |



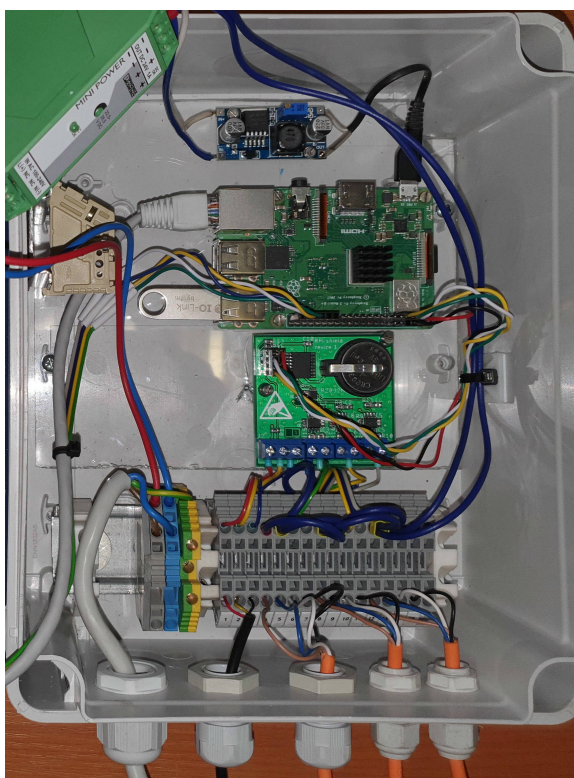
Obrázek 52: Fotka soustrojí s měřicím zařízením



Obrázek 53: Fotka testovaného elektromotoru, upevnění, měřicí zařízení



Obrázek 54: Výsledné zařízení, zvenku



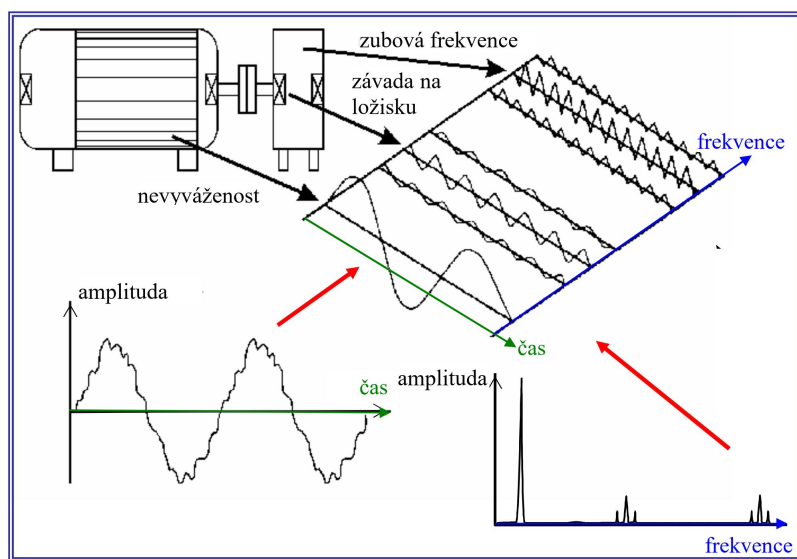
Obrázek 55: Výsledné zařízení, uvnitř

Příloha IV Analýza signálu ve frekvenční oblasti

Frekvenční oblast

Jednotlivé části vibrují s většinou různými frekvencemi. Každá časová vlna se skládá z příspěvků od těchto částí. Pro rozpoznání jednotlivých příspěvků se používá frekvenční analýza. Srovnání, které uvedeno v [3], popisuje orchestr, který má správnou hlasitost, tzn. celková hodnota vibrací je v normě, ale jeden nástroj hraje falešně, tzn. některá část stroj nepracuje správně. Celková intenzita není ovlivněna, ale sluchem poznáme problém. Toto se dá implementovat na vibrace, kdy vibrační diagnostik pozná na základě frekvenčního spektra, kde se závada nachází.

Frekvenční analýza se provádí pomocí Fourierovy transformace. Na obrázku 56 je znázorněn princip frekvenční analýzy. [3]

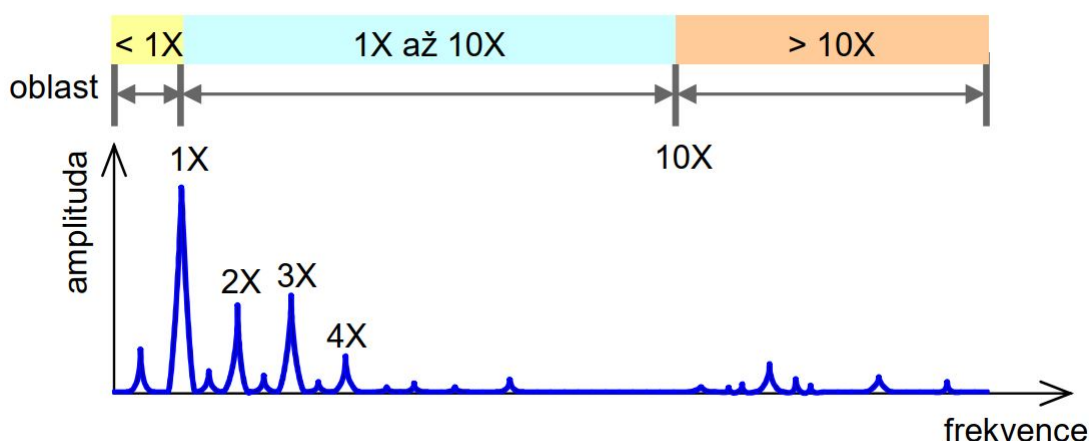


Obrázek 56: Princip frekvenční analýzy [3]

Pomocí Fourierovy transformace je převeden širokopásmový časový signál na diskrétní frekvence nebo na frekvenční pásma. Celkový signál od vibrací, včetně mechanického a elektrického šumu, se skládá ze sinusových složek, které jsou prostřednictvím této matematické metody zjištěny. V dnešní době se používá matematický postup zvaný rychlá Fourierova transformace neboli FFT. Výsledkem Fourierovy transformace je komplexní spektrum, které lze zobrazit jako amplitudu a fázi nebo reálnou a imaginární složku pro každou frekvenční složku. Fázové spektrum se většinou ignoruje, protože více praktických informací obsahuje spektrum amplitudové. Ukázka takového spektra je na obrázku 57, kdy na X ose je frekvence (Hz) a na ose Y amplituda. Vibrační signál, respektive tvar jeho časové vlny, je převeden pomocí FFT na jednotlivé sinusové složky. Tyto složky jsou funkcí frekvence. [6]

Při snímání vzorků může dojít ke dvěma chybám – aliasingu (podvzorkování) a úniku. Pro správné sejmutí vzorku sinusové vlny se používá nejčastěji Hanningovo² okno. To napomáhá

²Pojmenováno podle rakouského meteorologa Julia von Hanna, správně by mělo být Hannovo okno, avšak



Obrázek 57: Amplitudové frekvenční spektrum [3]

k tomu, aby se nevyskytl únik, což nastane v případě, kdy vzorek neobsahuje celý počet cyklů. Hanningovo okno je možno použít na sinusové vlny, které jsou v časových záznamech periodické i neperiodické. Principem Hanningova okna je potlačení konců signálu k nule. Tím se odstraní nespojitosti a signál se přiblíží periodickému signálu. Pro zvýraznění signálu existují i další okna, např. obdélníkové okno, Blackmanovo okno, Hammingovo okno nebo okno s plochým vrchem. Srovnání konstantního (obdélníkového) okna a Hanningova okna je na obrázku 58. U neperiodického signálu je ve spektru vidět podstatné zlepšení – spektrálních čar je jen několik. Podrobnější informace obsahuje norma „ČSN ISO 18431-2 Vibrace a rázy – Zpracování signálů – Část 2: Časová okna pro analýzu Fourierovou transformací“. [6, 3]

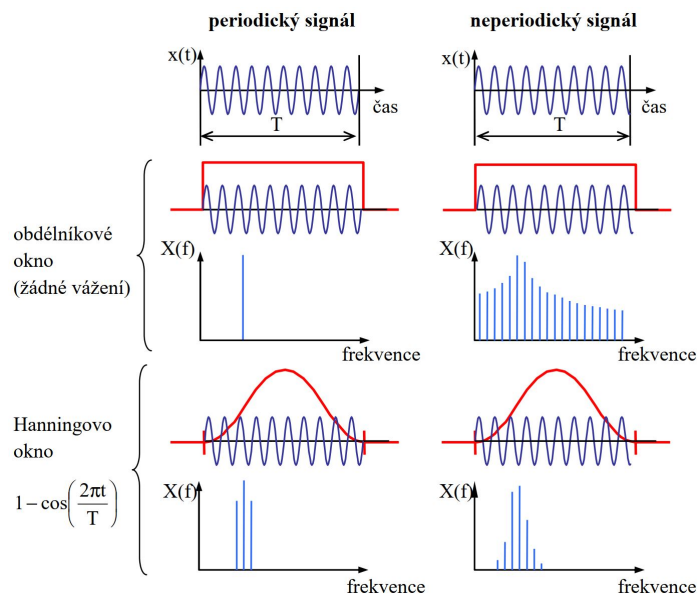
Analýza spektra

V rámci spektra je možné určit, kde se závada nachází. Z jakékoli odchylky od očekávaného stavu lze usuzovat vznikající závada stroje. Aby bylo možné toto vyčíst je třeba znát další informace o stroji jako jsou základní technické údaje, historie provozu, údržby a poruchy v minulosti. Díky těmto informacím se může určit jaké frekvence se v naměřeném spektru pravděpodobně vyskytnou a tím pádem je možné určit odchylky.

Na obrázku 57 je příklad, jaké informace je možné ze spektra vyčíst. 1X označuje otáčkovou frekvenci hřídele, 2X, 3X a 4X jsou potom celé násobky otáčkové frekvence (harmonické násobky). Pokus se objeví špičky v oblasti pod frekvencí otáčení, tzv. subsynchronní oblast, obvykle je to nebezpečná závada. Mechanické závady, jako nevyváženost, nesouosost nebo uvolnění, se vyskytují v oblasti do desetinásobku frekvence otáčení. Nad touto oblastí se nachází oblast vysokofrekvenčních událostí, které mohou značit závady valivých ložisek, ozubené apod.

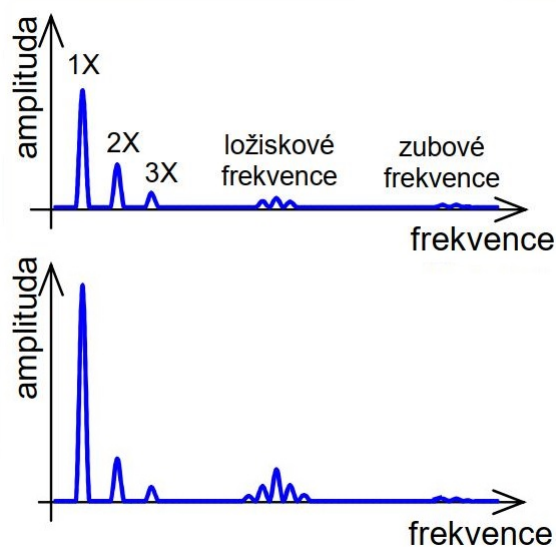
Přesné hodnoty pro vymezení těchto oblastí nejsou přesné dané. V praxi se považuje za správnou funkci stroj nový, popř. po opravě. V této chvíli je naměřeno spektrum, které je pak považováno za referenční. Při dalších kontrolách se naměřená spektra porovnávají s tímto

Hanningovo okno je obecně zavedený termín. Je důležité nezaměňovat za termín Hammingovo okno, pojmenovaný podle amerického matematika Richarda Hamminga. [14]



Obrázek 58: Srovnání spekter při různých váhových oknech [3]

referenčním spektrem. Příklad takovéto změny je uveden na obrázku 59, kde je možné vidět zvýšení špičky 1X, což může být způsobeno nevyvážeností nebo nesouosostí, a zvýšení špiček frekvencí od ložisek. Z toho vyplývá, že událost na 1X způsobila poškození ložiska. [6, 3]



Obrázek 59: Srovnání referenčního a naměřeného spektra [3]